

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS  
PARÁMETROS DE PROCESO EN EL  
PLEGADO DE LOS ACEROS INOXIDABLES  
AUSTENÍTICOS**

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA**

**Autor**

**LUIS GARCÍA JORGE**

**Tutor**

**José Antonio Canteli Fernández**

Leganés, Abril de 2009

***A mi familia***

## ***AGRADECIMIENTOS***

A mis padres, a mi hermana y en general al resto de mi familia, por haber sido los que me han aguantado durante todo este tiempo. Quiero agradecerles también la paciencia que han tenido conmigo y el apoyo que hasta ahora me han dado.

A José Canteli por dirigirme en este proyecto, facilitarme en todo momento información, datos, explicaciones y colaborar con mis caprichosos horarios.

A todos los compañeros de la Universidad Carlos III de Madrid que, en algún momento, han estado pendientes de mi proyecto.

En especial a mis abuelos, porque son los que más desean que llegue este día.

# **ÍNDICE**

## **1. INTRODUCCIÓN**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.1. Antecedentes</b>                             | <b>1</b>  |
| <b>1.2. Objetivos del proyecto</b>                   | <b>4</b>  |
| <b>1.3. Estructura del proyecto</b>                  | <b>4</b>  |
| <b>1.4. El acero inoxidable</b>                      | <b>5</b>  |
| 1.4.1. Tipos de aceros inoxidables                   | 6         |
| 1.4.2. Designación e identificación                  | 7         |
| 1.4.3. Selección de un acero inoxidable              | 8         |
| <b>1.5. El acero inoxidable austenítico AISI 304</b> | <b>10</b> |
| 1.5.1. Composición                                   | 12        |
| 1.5.2. Propiedades físicas                           | 12        |
| 1.5.3. Propiedades mecánicas                         | 14        |
| <b>1.6. Plegado</b>                                  | <b>18</b> |
| 1.6.1. Tipos de plegados                             | 19        |
| 1.6.2. Plegado en falso                              | 20        |
| 1.6.3. Plegado con golpe                             | 21        |
| <b>1.7. Recuperación elástica</b>                    | <b>21</b> |
| <b>1.8. Radio mínimo de plegado</b>                  | <b>22</b> |
| <b>1.9. Fuerza máxima de plegado</b>                 | <b>23</b> |
| <b>1.10. Modelos numéricos</b>                       | <b>24</b> |
| <b>1.11. Tipos de modelos numéricos</b>              | <b>25</b> |
| <b>1.12. Modelos de elementos finitos</b>            | <b>26</b> |

## 2. CREACIÓN DEL MODELO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.1. Geometrías</b>   | <b>29</b> |
| 2.1.1. Chapa   | 30        |
| 2.1.2. Matriz  | 30        |
| 2.1.3. Macho   | 31        |
| <b>2.2. Mallado: descripción y criterios</b>                   | <b>32</b> |
| <b>2.3. Material</b>   | <b>36</b> |
| 2.3.1. Chapa (Caracterización)                                 | 36        |
| <b>2.4. Condiciones de contorno (Movimientos y fijaciones)</b> | <b>38</b> |
| 2.4.1. Chapa   | 38        |
| 2.4.2. Matriz  | 38        |
| 2.4.3. Macho   | 39        |
| <b>2.5. Elementos de contacto</b>                              | <b>39</b> |
| <b>2.6. Resultados iniciales del modelo</b>                    | <b>40</b> |
| 2.6.1. Fuerza  | 40        |
| <b>2.7. Sensibilidad del modelo</b>                            | <b>42</b> |
| 2.7.1. Al tamaño de los elementos                              | 42        |
| 2.7.2. Al modulo de elasticidad                                | 43        |
| 2.7.3. Al coeficiente de rozamiento                            | 44        |
| 2.7.4. Al radio de punta                                       | 45        |

## 3. EXTENSIÓN DEL MODELO

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| <b>3.1. A otros espesores</b> | <b>46</b> |
| <b>3.2. A otras aberturas</b> | <b>47</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO</b>                            |            |
| 4.1. <i>Resultados ensayos reales en fuerza</i>              | <b>53</b>  |
| 4.2. <i>Optimización del modelo por ajuste de parámetros</i> | <b>58</b>  |
| 4.3. <i>Comparación de resultados</i>                        | <b>68</b>  |
| 4.4. <i>Error final del modelo</i>                           | <b>74</b>  |
| 4.5. <i>Validación del modelo</i>                            | <b>75</b>  |
| 4.6. <i>Resultados optimizados del modelo</i>                | <b>80</b>  |
| 4.6.1. Fuerza  | 80         |
| 4.6.2. Recuperación  | 94         |
| <b>5. ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS</b>                     | <b>101</b> |
| <b>6. CONCLUSIONES DEL PROYECTO</b>                          | <b>106</b> |
| <b>7. TRABAJOS FUTUROS</b>                                   | <b>109</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>                                       | <b>111</b> |

## **ÍNDICE DE GRÁFICAS**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Gráfica 1. Diagrama tensión-deformación</b>                                   | <b>14</b> |
| <b>Gráfica 2. Curvas para las ecuaciones de caracterización</b>                  | <b>37</b> |
| <b>Gráfica 3. Fuerza de plegado para un mallado de 1000 elementos</b>            | <b>41</b> |
| <b>Gráfica 4. Fuerza de plegado para un mallado de 3000 elementos</b>            | <b>41</b> |
| <b>Gráfica 5. Fuerza máxima de plegado frente al nº de elementos del mallado</b> | <b>43</b> |
| <b>Gráfica 6. Sensibilidad del módulo de elasticidad</b>                         | <b>44</b> |
| <b>Gráfica 7. Sensibilidad del coeficiente de rozamiento.</b>                    | <b>45</b> |
| <b>Gráfica 8. Fuerza plegado espesor 4, abertura 8·espesor</b>                   | <b>46</b> |
| <b>Gráfica 9. Fuerza plegado espesor 6, abertura 8·espesor</b>                   | <b>47</b> |
| <b>Gráfica 10. Fuerza plegado espesor 3, abertura 10·espesor</b>                 | <b>48</b> |
| <b>Gráfica 11. Fuerza plegado espesor 3, abertura 12·espesor</b>                 | <b>49</b> |
| <b>Gráfica 12. Fuerza plegado espesor 4, abertura 6·espesor</b>                  | <b>49</b> |
| <b>Gráfica 13. Fuerza plegado espesor 4, abertura 10·espesor</b>                 | <b>50</b> |
| <b>Gráfica 14. Fuerza plegado espesor 4, abertura 12·espesor</b>                 | <b>50</b> |
| <b>Gráfica 15. Fuerza plegado espesor 6, abertura 6·espesor</b>                  | <b>51</b> |
| <b>Gráfica 16. Fuerza plegado espesor 6, abertura 10·espesor</b>                 | <b>52</b> |
| <b>Gráfica 17. Ensayo real fuerza, espesor 3, abertura 8·espesor</b>             | <b>53</b> |
| <b>Gráfica 18. Ensayo real fuerza, espesor 3, abertura 10·espesor</b>            | <b>54</b> |
| <b>Gráfica 19. Ensayo real fuerza, espesor 3, abertura 12·espesor</b>            | <b>54</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Gráfica 20. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 6·espesor</b>          | <b>55</b> |
| <b>Gráfica 21. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 8·espesor</b>          | <b>55</b> |
| <b>Gráfica 22. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 10·espesor</b>         | <b>56</b> |
| <b>Gráfica 23. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 12·espesor</b>         | <b>56</b> |
| <b>Gráfica 24. Ensayo real fuerza, espesor 6, abertura 6·espesor</b>          | <b>57</b> |
| <b>Gráfica 25. Ensayo real fuerza, espesor 6, abertura 8·espesor</b>          | <b>57</b> |
| <b>Gráfica 26. Ensayo real fuerza, espesor 6, abertura 10·espesor</b>         | <b>58</b> |
| <b>Gráfica 27. Optimización fuerza plegado espesor 3, abertura 8·espesor</b>  | <b>59</b> |
| <b>Gráfica 28. Optimización fuerza plegado espesor 3, abertura 10·espesor</b> | <b>60</b> |
| <b>Gráfica 29. Optimización fuerza plegado espesor 3, abertura 12·espesor</b> | <b>61</b> |
| <b>Gráfica 30. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 6·espesor</b>  | <b>62</b> |
| <b>Gráfica 31. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 8·espesor</b>  | <b>63</b> |
| <b>Gráfica 32. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 10·espesor</b> | <b>64</b> |
| <b>Gráfica 33. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 12·espesor</b> | <b>65</b> |
| <b>Gráfica 34. Optimización fuerza plegado espesor 6, abertura 6·espesor</b>  | <b>66</b> |
| <b>Gráfica 35. Optimización fuerza plegado espesor 6, abertura 8·espesor</b>  | <b>67</b> |
| <b>Gráfica 36. Optimización fuerza plegado espesor 6, abertura 10·espesor</b> | <b>68</b> |
| <b>Gráfica 37. Zoom comparación fuerza plegado espesor 3, abertura 8·e</b>    | <b>69</b> |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>Gráfica 38. Zoom comparación fuerza plegado espesor 3, abertura 10·e</b>                              | <b>69</b> |
| <b>Gráfica 39. Zoom comparación fuerza plegado espesor 3, abertura 10·e</b>                              | <b>70</b> |
| <b>Gráfica 40. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 6·e</b>                               | <b>70</b> |
| <b>Gráfica 41. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 8·e</b>                               | <b>71</b> |
| <b>Gráfica 42. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 10·e</b>                              | <b>71</b> |
| <b>Gráfica 43. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 12·e</b>                              | <b>72</b> |
| <b>Gráfica 44. Zoom comparación fuerza plegado espesor 6, abertura 6·e</b>                               | <b>72</b> |
| <b>Gráfica 45. Zoom comparación fuerza plegado espesor 6, abertura 8·e</b>                               | <b>73</b> |
| <b>Gráfica 46. Zoom comparación fuerza plegado espesor 6, abertura 10·e</b>                              | <b>73</b> |
| <b>Gráfica 47. Resultado final fuerza plegado espesor 3, abertura 8·espesor</b>                          | <b>81</b> |
| <b>Gráfica 48. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 3, abertura 8·espesor</b>  | <b>81</b> |
| <b>Gráfica 49. Resultado final fuerza plegado espesor 3, abertura 10·espesor</b>                         | <b>82</b> |
| <b>Gráfica 50. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 3, abertura 10·espesor</b> | <b>82</b> |
| <b>Gráfica 51. Resultado final fuerza plegado espesor 3, abertura 12·espesor</b>                         | <b>83</b> |
| <b>Gráfica 52. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 3, abertura 12·espesor</b> | <b>83</b> |
| <b>Gráfica 53. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 6·espesor</b>                          | <b>84</b> |
| <b>Gráfica 54. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 6·espesor</b>  | <b>84</b> |
| <b>Gráfica 55. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 8·espesor</b>                          | <b>85</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Gráfica 56. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 8-espesor</b>  | <b>85</b> |
| <b>Gráfica 57. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 10-espesor</b>                         | <b>86</b> |
| <b>Gráfica 58. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 10-espesor</b> | <b>86</b> |
| <b>Gráfica 59. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 12-espesor</b>                         | <b>87</b> |
| <b>Gráfica 60. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 12-espesor</b> | <b>87</b> |
| <b>Gráfica 61. Resultado final fuerza plegado espesor 6, abertura 6-espesor</b>                          | <b>88</b> |
| <b>Gráfica 62. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 6, abertura 6-espesor</b>  | <b>88</b> |
| <b>Gráfica 63. Resultado final fuerza plegado espesor 6, abertura 8-espesor</b>                          | <b>89</b> |
| <b>Gráfica 64. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 6, abertura 8-espesor</b>  | <b>89</b> |
| <b>Gráfica 65. Resultado final fuerza plegado espesor 6, abertura 10-espesor</b>                         | <b>90</b> |
| <b>Gráfica 66. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 6, abertura 10-espesor</b> | <b>90</b> |
| <b>Gráfica 67. Comparación recuperación espesor 3, abertura 8-espesor</b>                                | <b>94</b> |
| <b>Gráfica 68. Comparación recuperación espesor 4, abertura 8-espesor</b>                                | <b>95</b> |
| <b>Gráfica 69. Comparación recuperación espesor 6, abertura 8-espesor</b>                                | <b>96</b> |

## **ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

|  |           |
|--|-----------|
| <b><i>Ilustración 1. Relación del AISI con los demás aceros inoxidables.</i></b>                 | <b>9</b>  |
| <b><i>Ilustración 2. Relación del AISI 304 con los inoxidables austeníticos</i></b>              | <b>11</b> |
| <b><i>Ilustración 3. Plegado al aire</i></b>   | <b>20</b> |
| <b><i>Ilustración 4. Plegado a fondo</i></b>   | <b>21</b> |
| <b><i>Ilustración 5. Chapa</i></b>   | <b>30</b> |
| <b><i>Ilustración 6. Apoyos</i></b>  | <b>30</b> |
| <b><i>Ilustración 7. Macho</i></b>   | <b>31</b> |
| <b><i>Ilustración 8. Chapa, matriz y macho en DEFORM 2D</i></b>                                  | <b>32</b> |
| <b><i>Ilustración 9. Zonas de mallado</i></b>  | <b>33</b> |
| <b><i>Ilustración 10. Resultado final de mallado</i></b>   | <b>34</b> |
| <b><i>Ilustración 11. Mallado uniforme</i></b>   | <b>34</b> |
| <b><i>Ilustración 12. Zoom del mallado con distintas dimensiones del elemento de mallado</i></b> | <b>35</b> |
| <b><i>Ilustración 13. Zoom del mallado sin utilizar distintas formas de mallado</i></b>          | <b>35</b> |
| <b><i>Ilustración 14. Definición del coeficiente de rozamiento</i></b>                           | <b>39</b> |
| <b><i>Ilustración 15. Relación entre objetos</i></b>   | <b>40</b> |
| <b><i>Ilustración 16. Recuperación elástica en el plegado</i></b>                                | <b>97</b> |

## **ÍNDICE DE ECUACIONES**

|                          |                  |
|--------------------------|------------------|
| <b><i>Ecuación 1</i></b> | <b><i>17</i></b> |
| <b><i>Ecuación 2</i></b> | <b><i>22</i></b> |
| <b><i>Ecuación 3</i></b> | <b><i>23</i></b> |
| <b><i>Ecuación 4</i></b> | <b><i>91</i></b> |
| <b><i>Ecuación 5</i></b> | <b><i>97</i></b> |

## **ÍNDICE DE TABLAS**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabla 1. Porcentaje de los componentes del acero inoxidable AISI 304</b>  | <b>12</b> |
| <b>Tabla 2. Características mecánicas del AISI 304</b>   | <b>18</b> |
| <b>Tabla 3. Anchos de chapa utilizados para cada espesor</b>   | <b>30</b> |
| <b>Tabla 4. Aberturas utilizadas para cada espesor de chapa</b>  | <b>31</b> |
| <b>Tabla 5. Valores de las curvas tensión-deformación para 4 diferentes temperaturas y para los 4 diferentes espesores</b> | <b>38</b> |
| <b>Tabla 6. Fuerza máxima obtenida para cada densidad de mallado</b>   | <b>42</b> |
| <b>Tabla 7. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'32</math></b>   | <b>76</b> |
| <b>Tabla 8. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'29</math></b>   | <b>76</b> |
| <b>Tabla 9. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'28</math></b>   | <b>77</b> |
| <b>Tabla 10. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'27</math></b>  | <b>77</b> |
| <b>Tabla 11. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'26</math></b>  | <b>77</b> |
| <b>Tabla 12. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'25</math></b>  | <b>78</b> |
| <b>Tabla 13. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'24</math></b>  | <b>78</b> |
| <b>Tabla 14. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'243</math></b>                                       | <b>78</b> |
| <b>Tabla 15. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'244</math></b>                                       | <b>79</b> |
| <b>Tabla 16. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'245</math></b>                                       | <b>79</b> |
| <b>Tabla 17. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'246</math></b>                                       | <b>79</b> |
| <b>Tabla 18. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para <math>\mu=0'247</math></b>                                       | <b>80</b> |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tabla 19. Recuperaciones para distintos ángulos, espesor 3</b>             | <b>94</b>  |
| <b>Tabla 20. Recuperaciones para distintos ángulos, espesor 4</b>             | <b>95</b>  |
| <b>Tabla 21. Recuperaciones para distintos ángulos, espesor 3</b>             | <b>96</b>  |
| <b>Tabla 22. Error recuperación teórica espesor 3 mm</b>                      | <b>98</b>  |
| <b>Tabla 23. Error recuperación teórica espesor 4 mm</b>                      | <b>99</b>  |
| <b>Tabla 24. Error recuperación teórica espesor 6 mm</b>                      | <b>100</b> |
| <b>Tabla 25. Valores iniciales fuerza máxima de plegado</b>                   | <b>101</b> |
| <b>Tabla 26. Optimización de las fuerzas máximas de plegado</b>               | <b>102</b> |
| <b>Tabla 27. Validación de las fuerzas máximas de plegado</b>                 | <b>102</b> |
| <b>Tabla 28. Recuperación de la chapa para diferentes ángulos y espesores</b> | <b>104</b> |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

Desde mediados del siglo XIX los procesos de conformado en frío de chapa metálica han ido adaptándose a la tecnología disponible en cada época marcando los hábitos y la filosofía de producción de las piezas obtenidas de chapa metálica. Así, de los métodos puramente manuales se ha ido pasando paulatinamente al uso de máquinas-herramienta e instalaciones que buscaban fundamentalmente, en cada momento, la productividad y fabricación de piezas con una alta calidad en el menor tiempo posible.

La automatización de los procesos industriales en estos últimos años ha dado lugar a un avance espectacular de la industria. Todo ello ha sido posible gracias a una serie de factores entre los que se encuentran:

- Las nuevas tecnologías en el campo mecánico
- La introducción de los ordenadores
- La evolución de los sistemas de control y regulación

La incorporación de los ordenadores en la producción ha sido el elemento clave que está permitiendo lograr la automatización integral de los procesos industriales. La aparición de la microelectrónica y de los microprocesadores, ha facilitado el desarrollo de técnicas de control complejas y con ello la robotización, la implementación de sistemas de control de procesos, la planificación de éstos, etc. Todos estos elementos llevan consigo la reducción de costes, el aumento de la productividad y la mejora del producto.

Se responde, así, a las necesidades del mercado que ha ido pidiendo a los productos, entre otras características:

- Una variedad de modelos cada vez mayor, reduciéndose las series largas por series medias, e incluso pequeñas series
- Una vida del producto muy corta, que exige cambios continuos en el sistema de fabricación
- Una reducción de los plazos de entrega, que obliga a acortar el ciclo de producción
- Un producto de alta calidad, o al menos, calidad uniforme del mismo nivel
- Y, por último, un precio cada vez mas bajo, para que el producto sea competitivo, lo que obliga a la reducción de costes.

El trabajo de chapa no ha escapado a las exigencias de producción actuales y ha tenido que ir reconvirtiendo sus sistemas de trabajo rígidos y convencionales por otros sistemas de mayor tecnología y flexibilidad.

Todo ello nos lleva al concepto de fabricación flexible, que obliga a los sistemas de fabricación a producir piezas diferentes, tanto en su forma geométrica y en el número de lote de la serie, como en la cantidad y tipo de operaciones que se realizan, de tal forma que los tiempos de preparación de la máquina sean mínimos.

Entre las operaciones mecánicas mas empleadas en las industrias automovilística, electrónica y aeronáutica se encuentra el plegado realizado en plegadores flexibles, que permiten obtener todo tipo de plegados dentro de un área determinada trabajando materiales de distintos espesores.

La posibilidad de controlar el ángulo de plegado mediante desplazamientos del punzón, permite plegar chapas a distintos ángulos sin necesidad de cambiar las herramientas empleadas. La precisión del producto final depende fuertemente de la recuperación elástica de la chapa, y puede ser mejorada mediante un conocimiento preciso de la misma. La recuperación elástica,



mencionada anteriormente, es el retorno parcial de la chapa a su posición inicial cuando cesa la fuerza empleada para plegarla. Este fenómeno que experimenta la chapa no se puede eliminar completamente por lo que al proyectar las herramientas y útiles, habrá que asignar ángulos de plegado más acentuados de forma que las piezas adquieran el ángulo deseado al cesar la acción deformante.

La recuperación elástica es función esencialmente:

- Del espesor de la chapa
- Del radio de plegado
- Del ángulo de plegado
- Del tipo de material elaborado
- Del módulo de Young y límite elástico del material.
- Del tratamiento térmico al que haya sido sometido antes del plegado.

Por lo tanto, para ser capaz de predecir la recuperación elástica de la chapa, una vez que la fuerza de plegado deja de actuar, es necesario tener información acerca de las propiedades mecánicas y el comportamiento típico del material.

Todo lo anterior lleva a determinar que el plegado tiene como parámetros importantes la fuerza máxima y la recuperación elástica del material que sufre la conformación elástica. Ambos casos serán estudiados en este trabajo en función de distintos materiales (lotes), espesores, aberturas, etc., es decir, se compararán diversos parámetros para posteriormente proceder, mediante el estudio por ensayos, por cálculo numérico (elementos finitos) y por cálculo analítico (fórmulas teóricas), a sacar conclusiones a cerca de la validez del modelo de estudio.

## 1.2. Objetivos del Proyecto

**El objetivo de este Proyecto consistirá en el establecimiento y validación de un modelo de elementos finitos que simule el proceso físico de plegado de chapa a temperatura ambiente.**

Para ello, se utilizarán una serie de ensayos de plegado en el laboratorio y, se estudiará la posibilidad de representar con un programa de elementos finitos (DEFORM 2D) las condiciones del ensayo. Por último, cuando se disponga de los resultados en el programa, se procederá a una optimización del modelo de elementos finitos que reproduzca lo más fielmente posible los ensayos realizados. Adicionalmente se compararán los resultados obtenidos con los valores teóricos empleados en los cálculos analíticos.

## 1.3. Estructura del Proyecto

Una primera parte del Proyecto consistirá en el estudio y posibilidades que ofrece DEFORM 2D para la modelización y representación del proceso tecnológico de plegado de chapa.

Se empezará confeccionando el modelo geométrico que tratará de representar, del modo más preciso los elementos que intervienen en el proceso de plegado: punzón, chapa, matriz... Es importante tener en cuenta que el modelo realizado es siempre una idealización del sistema físico real y es muy complicado que un análisis por elementos finitos nos proporcione la “solución exacta”. No obstante, confeccionando un modelo apropiado se pueden obtener unas soluciones suficientemente precisas.

Para obtener las propiedades mecánicas del material dispuesto a ser plegado se utilizan unos ensayos de tracción sobre probetas de este material. Esta información se introducirá en DEFORM para simular, lo más fielmente posible, el comportamiento de la chapa ante sollicitaciones exteriores como las fuerzas de plegado a las que se verá sometida para obtener un ángulo de doblado concreto.

Posteriormente se aplicará al modelo las cargas y condiciones de contorno que simularán el entorno operacional, obteniendo unos resultados que deberán ser analizados. Los cálculos deben completarse de forma que permitan la construcción, análisis y modificación en un tiempo razonable.

Llegados a este punto, será el momento de validar el modelo de elementos finitos a partir de los datos obtenidos experimentalmente. La validación consistirá en comparar los resultados proporcionados por el programa de elementos finitos (DEFORM 2D) con los obtenidos mediante ensayos físicos de plegado realizados en el laboratorio. El modelo “funcionará” cuando sendos resultados tengan un grado de aproximación aceptable.

Una vez validado el modelo, se empleará para analizar factores que intervienen en un proceso de plegado. Los resultados de los análisis se podrán utilizar para verificar el comportamiento real, así como para mejorar y optimizar el proceso. Para cumplir este objetivo se desarrollará un programa completo que consistirá en:

- Analizar la sensibilidad del modelo a:
  - Tamaño de los elementos
  - Módulo de Elasticidad
  - Al coeficiente de rozamiento
  - Radio de punta del macho

## **1.4. El acero inoxidable**

Este trabajo se centra en el plegado de los aceros inoxidables. Los aceros inoxidables son básicamente aleaciones de hierro-cromo. Otros metales actúan como elementos de aleación, pero el más importante es el cromo (mínimo 12%), donde su presencia es indispensable para otorgar la resistencia a la corrosión deseada. Los aceros inoxidables son utilizados donde es necesario resistencia a la corrosión, resistencia a altas y bajas temperaturas, resistencia a tracción, ductilidad, apariencia, etc.

#### **1.4.1. Tipos de aceros inoxidable.**

Los aceros inoxidable están divididos en grupos de acuerdo con la micro-estructura básica formada y con la posibilidad de endurecimiento por tratamiento térmico, los grupos principales son los martensíticos, los ferríticos, los austeníticos, los dúplex y los endurecidos por precipitación.

##### **1.4.1.1. Aceros inoxidable martensíticos**

Son aceros aleados al cromo y endurecidos por tratamiento térmico de temple, contienen de un 13 a un 17% de cromo y del 0 al 2% de níquel, su resistencia a la corrosión es más baja que la de los otros tipos y pueden alcanzar hasta 1400 Mpa de resistencia a la tracción; los más comunes son: AISI 410, AISI 420 y AISI 440.

##### **1.4.1.2. Aceros inoxidable ferríticos**

Son aceros aleados al cromo (de un 12 a un 30%), que no endurecen significativamente por tratamiento térmico. Son magnéticos y superiores en poder anticorrosión que los martensíticos. Su coste es bajo por no contener níquel. El AISI 430 y el AISI 436 son los más representativos de este grupo.

##### **1.4.1.3. Aceros inoxidable austeníticos**

Son aceros no magnéticos, aleados al cromo (16 al 25%) y al níquel (7 al 20%) que solamente endurecen por deformación en frío (endurecimiento mecánico). Son los inoxidable más ampliamente utilizados. Su resistencia a la corrosión es superior a los demás y no son magnéticos aunque pueden adquirir una cierta imantación por deformación en frío. Los aceros de la serie 300 ( AISI 304, AISI 302, AISI 304L, AISI 310, AISI 316, AISI 316L, AISI 317, AISI 321 y AISI 347) son los más significativos de este grupo, siendo el AISI 304 el más ampliamente usado y representativo.

#### **1.4.1.4. Aceros duplex**

Son una combinación de los inoxidables austeníticos y de los ferríticos. Los más representativos son el tipo 2205 y el S31803, superiores en resistencia y poder anticorrosivo.

#### **1.4.1.5. Aceros endurecidos por precipitación.**

Contienen cromo y níquel además de cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Tienen alta resistencia y tenacidad y buena resistencia a la corrosión.

#### **1.4.2. Designación e identificación.**

Se usan tres clasificaciones generales:

- Estructura metalúrgica.
- Sistema Unificado, desarrollado por Sociedad americana para Pruebas de Materiales (ASTM) y la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE)
- Sistema AISI (Instituto Americano de la Siderurgia, American Iron and Steel Institute) que establece la clasificación de los aceros inoxidables en los tres grupos siguientes:
  - Aceros austeníticos al cromo-manganeso-níquel, serie 200.
  - Aceros austeníticos al cromo-níquel, serie 300.
  - Aceros ferríticos y martensíticos al cromo solo, serie 400.

Esta unificación se ha llevado a cabo para limitar la multiplicidad de tipos y prescripciones previamente existentes.

### 1.4.3. Selección de un acero inoxidable.

La selección de un acero inoxidable depende de un grupo de propiedades, debiendo ser considerados los siguientes factores:

-RESISTENCIA A LA CORROSIÓN QUÍMICA: agentes corrosivos, concentración, contaminantes, temperatura.

-PROPIEDADES MECÁNICAS: tracción, compresión, torsión, flexión, impacto, etc.

-CARACTERÍSTICAS DE FABRICACIÓN: conformabilidad, mecanizado, deformación en frío, soldadura, etc.

-CARACTERÍSTICAS DE ACABADO: apariencia, rugosidad, brillo, facilidad de limpieza, facilidad de esterilización, etc.

-COSTE TOTAL: La elección de un acero inoxidable depende de muchos factores, por consiguiente es necesario realizar un balance entre todas sus características para una correcta aplicación.

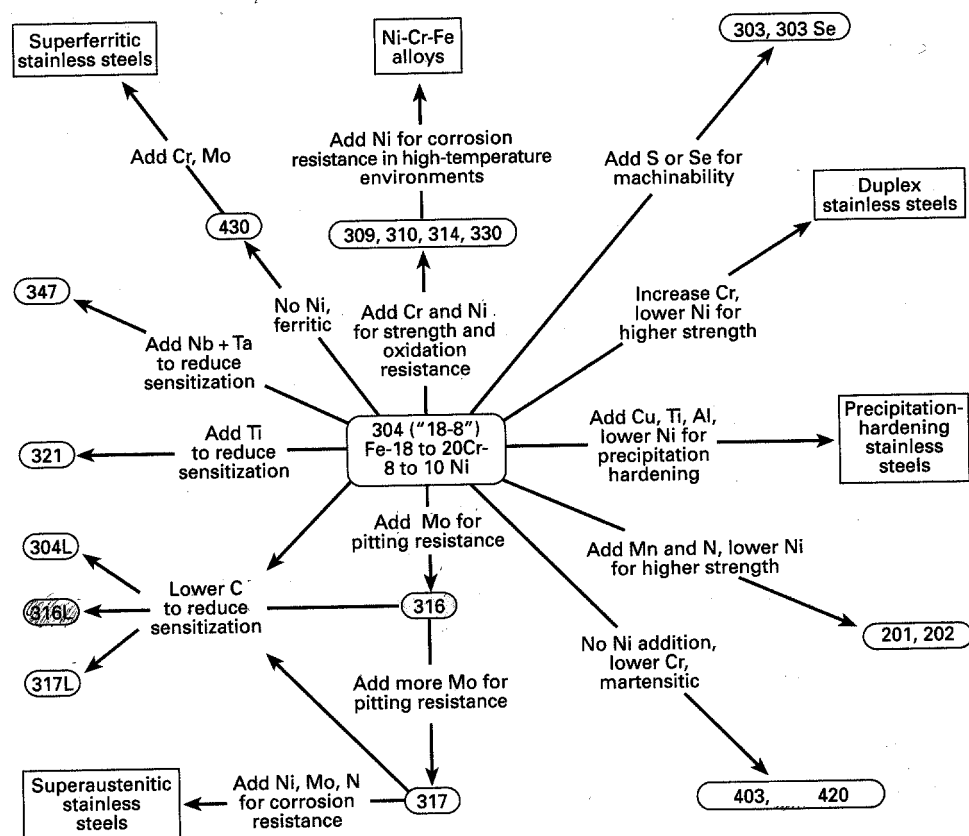
En este trabajo se ha elegido el acero inoxidable austenítico por ser el inoxidable más empleado en la industria representando este tipo más del 50% del consumo total de aceros inoxidables. Dentro de este grupo se ha escogido el AISI 304 por ser el más ampliamente utilizado y por tener un conjunto de propiedades muy representativas del conjunto del grupo, lo que le convierten en un buen modelo.

Entre estas propiedades destacan:

- Elevada resistencia a la corrosión.
- Elevada conformabilidad.
- Buenas características mecánicas.
- Elevada resistencia a la fluencia.

- Elevada tenacidad incluso a temperaturas criogénicas.
- Buena resistencia al desgaste.
- Buena resistencia a sollicitaciones por fatiga.
- Características elevadas de deformación en frío.
- Elevada soldabilidad.
- Altas características de higiene.
- Muy baja permeabilidad magnética, aunque aumenta por la deformación en frío.

En el siguiente esquema se muestra la relación del AISI 304 con los demás aceros inoxidable. (Fuente ASM):



**Ilustración 1. Relación del AISI con los demás aceros inoxidable.**

## 1.5. El acero inoxidable austenítico AISI 304

El acero inoxidable austenítico AISI 304 es esencialmente una aleación terciaria de hierro-cromo-níquel (Fe-Cr-Ni) con una composición nominal del 18 % de Cromo, y 8 % de Níquel. Es la aleación más usada del grupo austenítico y su estructura es similar a la de la austenita, de ahí su nombre. La austenita es la solución sólida del carbono (C) en el hierro gamma (Fe  $\gamma$ ), la cual por su forma de red atómica, mantiene al carbono en solución, incluso en cantidades importantes. Por analogía, se denominan austeníticas todas las soluciones sólidas de otros elementos en el hierro, (en particular en el caso de los aceros inoxidables, las de cromo y las de níquel).

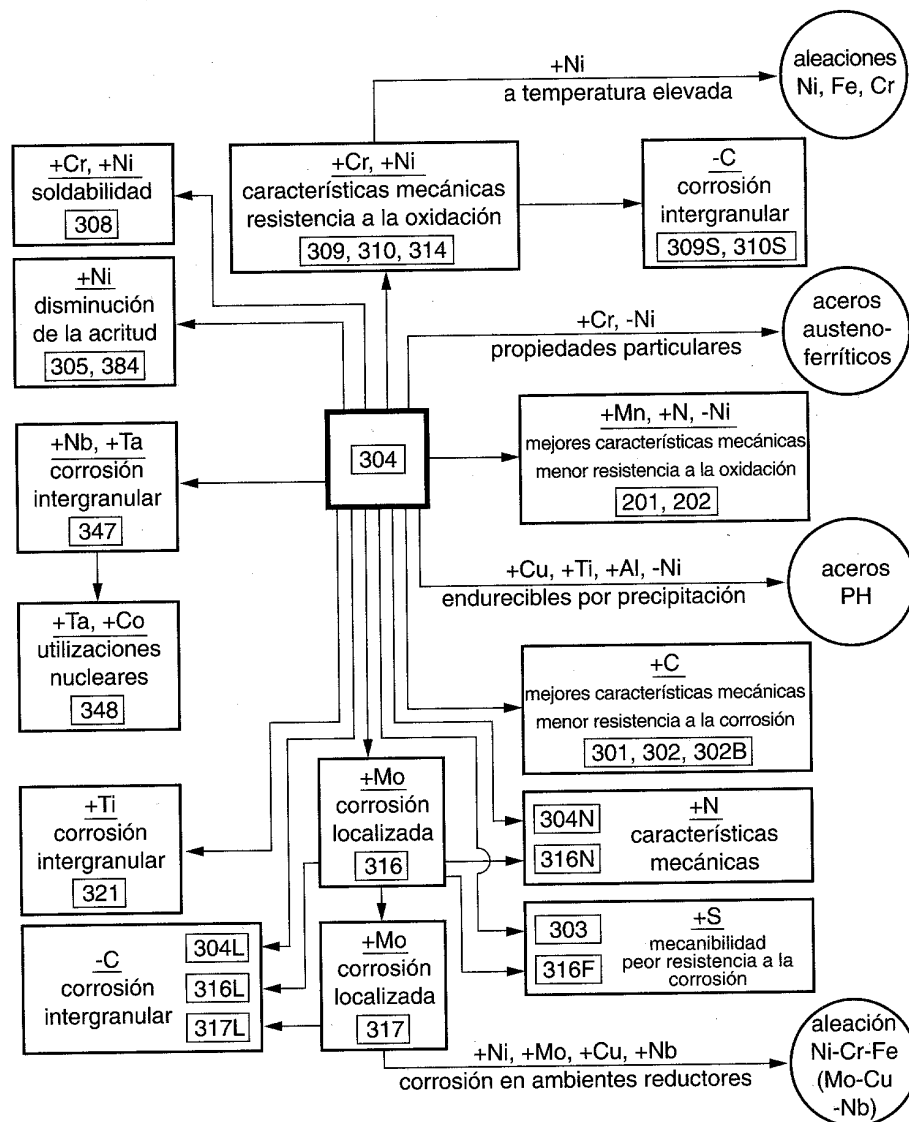
El hierro  $\gamma$  es una de las diferentes formas alotrópicas que presenta el hierro mediante la cual, los átomos se ordenan según una red cúbica de caras centrada (estructura FCC). Esta forma de hierro tiene una buena capacidad disolvente del carbono (átomos más pequeños colocados en los intersticios), y puede tenerlo en solución incluso en cantidades relativamente importantes, así como el níquel y el cromo.

La presencia del níquel, que posee una estructura cristalina FCC, permite obtener esta estructura a temperatura ambiente.

La elevada conformabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304 es debida a su estructura cristalina FCC. Se entiende por conformabilidad la capacidad de un material para ser deformado de una forma prefijada.

A continuación se muestra un esquema de la relación del AISI 304 con los inoxidables austeníticos. (Fuente: GRUPINOX)





**Ilustración 2. Relación del AISI 304 con los inoxidables austeníticos**

El acero inoxidable AISI 304 tiene una mayor resistencia a la corrosión que los martensíticos y que los ferríticos, porque los carburos pueden ser retenidos en soluciones sólidas por enfriamiento rápido a altas temperaturas.

El acero inoxidable no puede ser endurecido por tratamiento térmico, pero se puede aumentar su resistencia por deformación en frío (acritud) y presentar de esta forma unas excelentes características mecánicas.

Tiene una alta resistencia y límite elástico, al mismo tiempo que buena ductilidad y dureza, por lo que es utilizado en una amplia variedad de diseños y aplicaciones.

En aplicaciones en arquitectura resiste una corrosión normal, no es reactivo en la gran mayoría de los procesos alimentarios, resiste sustancias químicas orgánicas y una gran cantidad de sustancias químicas inorgánicas.

### 1.5.1. Composición

El acero inoxidable AISI 304, llamado a menudo 18-8, tiene una composición nominal del 18 % de cromo (Cr) y del 8 % de níquel (Ni) y las cantidades indicadas de otros elementos que se exponen en la tabla.

| C    | Mn | P     | S    | Si | Cr    | Ni     | Fe    |
|------|----|-------|------|----|-------|--------|-------|
| 0.08 | 2  | 0.045 | 0.03 | 1  | 18-20 | 8-10.5 | Resto |

**Tabla 1. Porcentaje de los componentes del acero inoxidable AISI 304**

El cromo proporciona a la aleación su característica resistencia a la corrosión. El incremento de la proporción de níquel repercute en una disminución de la acritud durante la deformación plástica.

### 1.5.2. Propiedades físicas

Se describen brevemente a continuación, las principales propiedades físicas del AISI 304.

#### *Coeficiente de dilatación térmica*

En general todos los cuerpos incrementan su volumen con el aumento de temperatura, excepto sustancias anómalas como el agua. El coeficiente de dilatación se define como el alargamiento relativo experimentado por un material al elevar su temperatura un grado.

Es una propiedad importante sobre todo cuando están en contacto elementos con coeficiente de dilatación distinto. La variación de longitud es proporcional a las dimensiones del elemento, al incremento de temperatura y a su longitud.

#### *Conductividad térmica*

Indica la facilidad con la que el calor fluye a lo largo del material. La fácil evacuación impide la elevación de temperatura por fricción o deformación.

Su baja conductividad provoca elevaciones importantes de temperatura allí donde el calor es producido o aplicado, sin extenderse a zonas próximas lo que en el caso de plegado en caliente facilita la operación de conformación.

#### *Calor específico*

Representa la cantidad de calor que se puede almacenar en un material. Indica el aumento de temperatura como resultado de aplicar una determinada cantidad de energía. Se define como la cantidad de energía necesaria para aumentar un grado la unidad de masa.

#### *Peso específico*

El peso específico del acero inoxidable AISI 304 es ligeramente superior al de otros aceros inoxidables. Se emplea normalmente el valor de 7800 Kg/m<sup>3</sup>. Dada su mínima variación con la temperatura se utilizará este dato como constante.

A la vista de las figuras anteriores, se puede afirmar que:

- Para temperaturas inferiores a la ambiente:

Al disminuir la temperatura disminuyen la conductividad térmica, el coeficiente de dilatación térmico y el calor específico mientras que aumenta con la disminución de temperatura, el peso específico.

- Para temperaturas superiores a la ambiente:

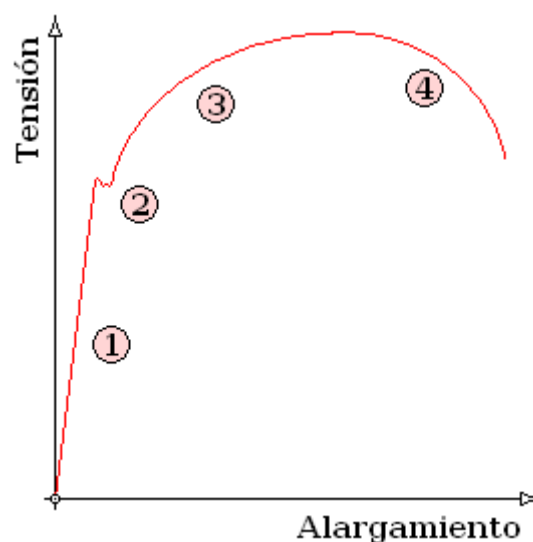
Al aumentar la temperatura disminuye el peso específico y aumentan el coeficiente de dilatación térmica, el calor específico y el coeficiente de conductividad térmica.

### 1.5.3. Propiedades mecánicas

En el proceso de conformado de chapa, las piezas son sometidas a fuerzas externas con el fin de conseguir las formas deseadas. Debido a que la deformación se realiza mediante medios mecánicos es importante conocer la respuesta de los materiales a las fuerzas aplicadas

#### *Diagrama tensión-deformación*

En el ensayo de típico de tracción se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas:



**Gráfica 1. Diagrama tensión-deformación**

1. Deformaciones elásticas: en esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.

2. Fluencia o cedencia. Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

3. Deformaciones plásticas: si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.

4. Estricción. Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-

deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

Otras características que pueden caracterizarse mediante el ensayo de tracción son la resiliencia y la tenacidad, que son, respectivamente, las energías elástica y total absorbida y que vienen representadas por el área comprendida bajo la curva tensión-deformación hasta el límite elástico en el primer caso y hasta la rotura en el segundo.

### *Ductilidad*

La ductilidad es la propiedad que presentan algunos metales y aleaciones cuando, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sin romperse permitiendo obtener alambres o hilos. A los metales que presentan esta propiedad se les denomina dúctiles.

En otros términos, un material es dúctil cuando la relación entre el alargamiento longitudinal producido por una tracción y la disminución de la sección transversal es muy elevada.

En el ámbito de la metalurgia se entiende por metal dúctil aquel que sufre grandes deformaciones antes de romperse, siendo el opuesto al metal frágil, que se rompe sin apenas deformación.

Se mide como:

$$\% \text{alargamiento} = \frac{Longitud_{final} - Longitud_{inicial}}{Longitud_{inicial}} \cdot 100$$

**Ecuación 1**

Donde:

Longitud inicial es la longitud entre la marca de calibración sobre la muestra antes de la prueba.

Longitud final es la longitud entre esa misma marca de calibración después de la prueba cuando se unen las superficies fracturadas de la muestra.

### *Fatiga*

En ingeniería y, en especial, en ciencia de materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad. La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes (puentes, aviones, etc.). Puede ocurrir a una tensión menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática. Es muy importante ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también ocurre en polímeros y cerámicas.

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aun en metales dúctiles, puesto que no hay apenas deformación plástica asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio, y posterior propagación, de fisuras. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo.

### *Fluencia*

La fluencia es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada que se puede llegar a producir en el ensayo de tracción (depende del material, algunos experimentan fluencia, otros no). El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su

deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

Se aprecia gráficamente en la curva tensión-deformación (ilustración 1) obtenida tras un ensayo de tracción: el periodo de fluencia se sitúa en el 2.

En la siguiente Tabla se recogen valores generales de las propiedades mecánicas del AISI 304.

| Módulo de Young      | Límite elástico | Tensión de rotura | Alargamiento % | Reducción de área % | Módulo de Poisson |
|----------------------|-----------------|-------------------|----------------|---------------------|-------------------|
| $2 \cdot 10^{11}$ Pa | 200 MPa         | 512 MPa           | 45             | 80                  | 0.26              |

**Tabla 2. Características mecánicas del AISI 304**

Estas propiedades dependen de la variación en la composición permitida. Por ejemplo el porcentaje de cromo y aún más influyente el porcentaje de carbono, determinan variaciones en las características mecánicas, con lo que estas fluctúan en un rango de valores, todos ellos por encima de los mínimos indicados. No obstante estos valores serán los que se usen como punto de referencia para el establecimiento de variaciones relativas con respecto a la temperatura ambiente de las características mecánicas a temperaturas superiores.

## 1.6. Plegado

El plegado de chapa con un punzón y una matriz montados en una plegadora es un hecho bastante natural y habitual. En principio no parece que esta operación sea complicada y difícil. No obstante, el plegado de chapa no es tan simple como parece.



Muchos operarios encuentran inexplicables problemas durante el proceso de plegado.

Por ejemplo, problemas como que no se obtienen los perfiles deseados, que el perfil está fuera de las tolerancias dimensionales que se exigen, marcas en las piezas o roturas durante el proceso de plegado.

A continuación explicaremos que existen tres tipos de plegado en relación a la fuerza de plegado aplicada.

### **1.6.1. Tipos de plegado**

Al realizar un plegado de una chapa en una plegadora, esta se ve sometida a una presión gradual al estar situada entre el punzón y la matriz. El plegado de la pieza estará en relación con la fuerza aplicada.

Cuando realizamos un plegado, la elasticidad de la chapa no se elimina aunque el esfuerzo producido en la chapa haya excedido el límite elástico. Podemos considerar al límite elástico como el punto donde la chapa cede al esfuerzo. La plasticidad está más allá de ese punto. Este es el motivo del retorno elástico.

Cuando se realiza un plegado la parte interior de éste es comprimida y la parte exterior es extendida o alargada. Entre estas caras existe un plano intermedio, llamado neutro, en el cual no se produce ni compresión ni extensión.

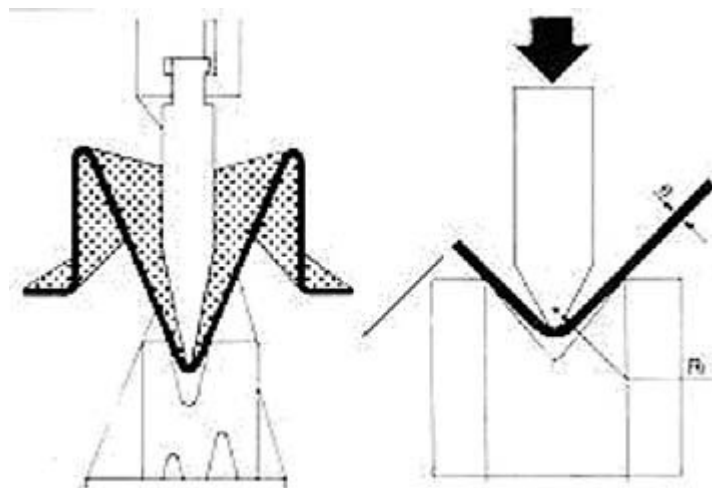
Cuando una chapa es plegada, los esfuerzos que son opuestos actúan en la cara interior y exterior de la chapa. En general, la resistencia a la compresión de la chapa es mucho mayor que su resistencia a la tracción (extensión). La presión ejercida deformará permanentemente la parte exterior de la chapa, pero la parte interior no llega al límite elástico. Por tanto, la parte interior tiende a recuperar su forma inicial. Puesto que el esfuerzo es una fuerza de resistencia que actúa en oposición a la fuerza externa aplicada, el esfuerzo de compresión actúa hacia fuera de la cara interior. Este esfuerzo de compresión se convierte en retorno elástico.

### 1.6.2. Plegado en falso

En este tipo de plegado no se produce penetración en la chapa, por lo tanto se conserva su espesor original. Puede realizarse de dos maneras:

#### 1.6.2.1. Al aire

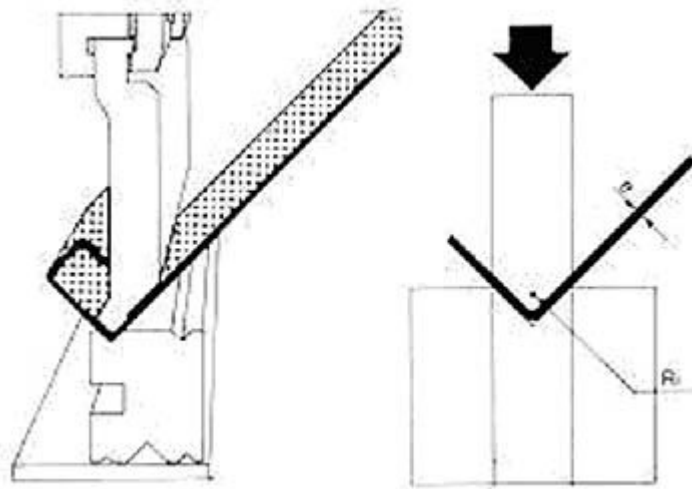
El ángulo del plegado se obtiene en función de la penetración del punzón en la matriz. De esta manera, con el mismo utillaje se puede obtener una amplia gama de ángulos modificando el punto muerto inferior del punzón. La precisión angular de plegado es inferior que en el siguiente caso:  $\pm 1^\circ$



**Ilustración 3. Plegado al aire**

#### 1.6.2.2. A fondo

Se detiene el avance del punzón cuando la chapa entra en contacto con las paredes de la “V”, sin que haya penetración, con lo que se conservará algo de elasticidad. De esta manera se puede obtener una precisión angular de  $\pm 30^\circ$ .



**Ilustración 4. Plegado a fondo**

### 1.6.3. Plegado con golpe

Se realiza con penetración de la chapa por parte del punzón, lo que conlleva una disminución local de espesor, aunque permite obtener una elevada precisión angular:  $\pm 15'$ . Suele reservarse para espesores  $> 2$  mm por las elevadas potencias que se necesitan.

## 1.7. Recuperación elástica

La recuperación de los aceros inoxidables es función de su resistencia, del ángulo de plegado y del radio de plegado. Para los ángulos típicos de  $90^\circ$ , los inoxidables del tipo AISI 304 recocidos recuperan de 1 a  $5^\circ$ , para radios comprendidos entre el valor del espesor y 6 veces éste.

En la operación de plegado se puede reducir o anular el error del ángulo reduciendo el radio del punzón, clavando la chapa contra la matriz o doblando a un ángulo previo inferior que compense la recuperación. Si la chapa es de espesor grueso, se debe cuidar el alargamiento de las fibras exteriores, para que no pase del 75% del máximo admisible del material. Para alargamientos superiores, el plegado debe ser efectuado en caliente.

Se puede apreciar que los valores esperables de la recuperación en el plegado del AISI 304, en su estado normal de recocido, y para valores bajos de R/T son del orden del 95 al 99%, es decir, valores de la recuperación para ángulos usuales de 90° del orden de 2 a 5°.

Se utiliza en la literatura especializada, entre otras, la siguiente fórmula para la determinación del coeficiente de recuperación:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left( \frac{R_i \cdot Y}{E \cdot T} \right) - 3 \left( \frac{R_i \cdot Y}{E \cdot T} \right) + 1$$

#### **Ecuación 2**

Donde  $R_i$  y  $R_f$  representan los radios de curvatura antes y después de subir el punzón, Y es el límite elástico al 0.2%, E y T son el módulo de elasticidad y el espesor respectivamente.

### **1.8. Radio mínimo de plegado**

Normalmente se expresa como múltiplo del espesor el radio mínimo de curvatura que produce la grieta en la cara del material sometida a tracción. En general la relación mínima entre el radio y el espesor R/t de la chapa, depende en exclusiva del material empleado.

Generalmente se admite que el valor de la deformación verdadera, al agrietarse las fibras exteriores en el plegado, coincide con el valor de la deformación verdadera en la rotura durante el ensayo de tracción simple del material. También se asume que el material es isotrópico y homogéneo y que se encuentra en un estado de deformación plana por ser la relación longitud-espesor L/t un valor pequeño.

Los valores mínimos teóricos de la relación  $R/t = (50/r)-1$ , aunque por lo general, se utiliza la relación  $R/t = (60/r)-1$ , ya que se ajusta en mayor medida a los valores experimentales y donde r es el porcentaje de la reducción de área en la rotura en el ensayo de tracción.

En los aceros inoxidables austeníticos, donde el porcentaje de reducción alcanza valores del 60 al 75%, el valor de la relación R/t llega a valer 0 y por lo tanto, dichos aceros pueden plegarse, a temperatura ambiente, hasta ser doblados sobre sí mismos, sin rotura ni aparición de grietas.

## 1.9. Fuerza máxima de plegado

Las fuerzas de plegado (F) pueden ser estimadas suponiendo que el proceso se corresponde con un plegado simple en una viga rectangular. Dicha fuerza va a depender del límite elástico del material ( $\sigma_e$ ), la longitud de plegado (L), el espesor de la chapa (G) y de la abertura de la matriz (v).

Si se dan las condiciones de:

- Plegado al aire
- Superficie de los radios de repliegue del útil interior y superficie de la chapa limpias.
- Ancho de la matriz sea superior al espesor,  $v \approx 8g$
- Y no se tiene en cuenta la fricción. La fuerza máxima de plegado ( $F_{\max}$ ) se expresa como:

$$F_{\max} = c_1 \frac{g^2 \cdot \sigma_u \cdot L}{v}$$

**Ecuación 3**

Donde:

“ $c_1$ ” es un coeficiente que depende, entre otros parámetros, del espesor de la chapa (g) y abertura de la matriz (v).

La fuerza de plegado varía con la bajada del punzón. En el plegado al aire, la fuerza se incrementa de cero hasta su valor máximo ( $F_{\max}$ ) y luego decrece debido a la reducción sucesiva de espesor en la zona de plegado.

## 1.10. Modelos numéricos

Los modelos numéricos son basados en los modelos matemáticos y permiten obtener el comportamiento del sistema para diferentes condiciones de operación y diferentes parámetros de diseño.

Un aspecto importante es que muy pocos problemas pueden ser resueltos por procedimientos analíticos, siendo necesario el empleo de métodos numéricos para resolver las ecuaciones que gobiernan los sistemas reales.

Los modelos numéricos están referidos a la reestructuración y discretización de las ecuaciones que gobiernan el sistema, para luego ser resueltas empleando el computador.

Todos los modelos son aproximaciones y simplificaciones de la realidad. De acuerdo a las características físicas reales del fenómeno, se selecciona o construye el modelo más simple posible, cuyas suposiciones describan más adecuadamente el fenómeno con el grado de aproximación que sea aceptable. Este grado de aproximación aceptable lo decide a priori y arbitrariamente el modelador o el usuario de acuerdo a los fines para los que pretende destinar el modelo.

Como fuentes de errores de la solución aproximada son:

- falta de correspondencia entre el problema matemático (modelo matemático) y el fenómeno real que ha de ser estudiado
- el error de los datos iniciales (parámetros de entrada)
- el error del método de solución
- los errores de los redondeos de los números en las operaciones aritméticas y otras

## 1.11. Tipos de modelos numéricos

Algunos tipos de métodos numéricos son:

- **Interpolación lineal**

Garantiza que dada una función o una sucesión de datos, podremos encontrar un polinomio que nos asegure que, evaluado en esa sucesión de datos, su valor es igual al valor original

- **Métodos de mínimos cuadrados**

Consiste en aproximar una función  $g(x)$  a diferentes  $f(x)$ , de tal manera que  $g(x)=f(x)$ .

Este método causa una suavización de la curva formada por un conjunto de datos y elimina en algún grado los errores del observador, de medición, de registro, de transmisión y de conversión; así como otro tipo de errores aleatorios que contengan los datos.

Es un método diferente de la interpolación, debido a que el polinomio de interpolación se iguala exactamente con los puntos dados, lo cual puede causar que se conserven los errores que pudieran tener los datos.

- **Método de Montecarlo**

Es un tipo de simulación que emplea las distribuciones de probabilidad para determinar si ocurrirán o no determinados eventos aleatorios.

- **Polinomio de Taylor**

Aunque los valores de funciones polinomiales se pueden encontrar efectuando un número determinado de sumas y multiplicaciones, hay funciones que no se pueden manipular tan sencillamente, como la logarítmica, la exponencial y las trigonométricas, por lo que se hace necesario desarrollarlas mediante el polinomio de Taylor, que no sólo nos garantiza la igualdad en los puntos de colocación, sino que nos garantiza oscilación en todas sus derivadas.

Como en todos los casos de aproximación lineal, una vez que tenemos la aproximación adecuada, podemos derivarla, integrarla, evaluarla, conocer su comportamiento, obtener sus raíces y. en general, emplearla para hacer cualquier tipo de operaciones que necesitemos.

- **Método de Cauchy**
- **Método de Gauss**
- **Polinomio interpolador de Lagrange**
- **Polinomio interpolador de Newton**

## **1.12. Modelos de Elementos finitos**

El Método de Elementos Finitos consiste en un modelo informático del material o diseño que es tensado y analizado para conseguir resultados específicos. Es usado en el diseño de nuevos productos, y en la mejora de los actuales. Una empresa capaz de verificar un diseño propuesto será capaz de ajustarse a las especificaciones del cliente antes de la fabricación ó construcción. Modificando un producto o estructura existente es utilizado para calificarlo para unas nuevas condiciones de servicio. En caso de fallo estructural, el Método de Elementos Finitos puede ser usado para ayudar a determinar el diseño de las modificaciones para ajustarse a las nuevas condiciones.

Hay generalmente dos tipos de análisis que son usados en la industria: modelos en 2D y en 3D. Mientras los modelos en 2D conservan la simplicidad y permiten que el análisis se realice en un ordenador normal, tiende a dar resultados menos precisos. El modelado en 3D, sin embargo, producen resultados más precisos mientras sacrifica la habilidad para funcionar de manera efectiva en cualquier ordenador, menos en los más rápidos. Con cada uno de estos esquemas modelados, el programador puede insertar numerosos algoritmos ó funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal. Los sistemas lineales son menos complejos y normalmente no tienen en cuenta deformaciones plásticas. Los sistemas no lineales toman en cuenta las deformaciones plásticas, y algunos incluso son capaces de testear el material hasta la fractura.

El Método de Elementos Finitos es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. Para ello trabaja discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras), que se conectan entre sí mediante “nodos”. La



solución ahora es sólo aproximada en función de los resultados obtenidos para los nodos. El Método de Elementos Finitos parte del cálculo matricial en el planteamiento del equilibrio en los nodos mediante un sistema de ecuaciones resultado de la contribución de los elementos.

El Método de Elementos Finitos usa un complejo sistema de puntos llamados nodos que hacen una red llamada malla. Esta malla está programada para contener el material y las propiedades de la estructura que definen como esta reaccionará ante ciertas condiciones de carga. A los nodos se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de estrés anticipado en un área. Las regiones que recibirán gran cantidad de estrés tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente testeados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevado estrés. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

En general, hay tres fases en cualquier tarea asistida por computador:

- Pre-procesamiento. Definir el modelo de elementos finitos y los factores ambientales que influyen en él.
- Solución del análisis. Solucionar el modelo de elementos finitos.
- Post-procesamiento de resultados usando herramientas de visualización.

### *Pre-procesamiento*

El primer paso en Análisis por Elementos Finitos, pre-procesamiento, es construir un modelo de elementos finitos de la estructura a ser analizada. En muchos paquetes de Análisis por Elementos Finitos se requiere de la entrada de una descripción topológica de las características geométricas de la estructura. Ésta puede ser 1D, 2D, o 3D. El objetivo principal del modelo es replicar de manera realista los parámetros importantes y características del modelo real. La manera más sencilla para conseguir similaridad en el análisis es utilizar planos

preexistentes, modelos CAD, o datos importados de un ambiente Análisis por Elementos Finitos. Una vez se ha creado la geometría, se utiliza un procedimiento para definir y dividir el modelo en "pequeños" elementos. En general, un modelo de elementos finitos está definido por una malla, la cual está conformada por elementos y nodos. Los nodos representan puntos en los cuales se calcula el desplazamiento (análisis estructural). Los paquetes de Análisis por Elementos Finitos enumeran los nodos como una herramienta de identificación. Los elementos están determinados por conjuntos de nodos, y definen propiedades localizadas de masa y rigidez. Los elementos también están definidos por la numeración de la malla, la cual permite referenciar la correspondiente deflexión o esfuerzo (en análisis estructural) para una localización específica.

#### *Análisis (cómputo de la solución)*

En la siguiente etapa en el proceso de análisis de elementos finitos se lleva a cabo una serie de procesos computacionales que involucran fuerzas aplicadas, y las propiedades de los elementos de donde producir un modelo de solución. Tal análisis estructural permite la determinación de efectos como lo son las deformaciones, estiramiento o *estrés* que son causados por fuerzas estructurales aplicadas como lo son la fuerza, la presión y la gravedad.

#### *Post-procesamiento (visualización)*

Estos resultados entonces pueden ser estudiados utilizando herramientas visuales dentro del ambiente de FEA para ver y para identificar completamente las implicaciones del análisis. Herramientas numéricas y gráficas permiten la localización precisa de información como esfuerzos y deformaciones a ser identificadas.

## 2. CREACIÓN DEL MODELO

Dentro del Preprocesador se procede a la representación geométrica de los componentes que intervienen en el proceso de plegado. Posteriormente el modelo geométrico se subdivide en elementos discretos (mallado) a los que se asignan las propiedades del material que representan.

### 2.1. Geometrías

El primer paso esencial en el proceso de elementos finitos, es la creación de la representación geométrica precisa de los útiles que intervienen en el proceso de plegado: chapa, matriz y macho o punzón.

En el proceso de plegado al aire en V la chapa se sitúa sobre la matriz y es presionada por un punzón hasta alcanzar un ángulo especificado (en este caso  $90^\circ$ ). La longitud de la placa a plegar es mucho mayor que su espesor. De este modo, se puede decir que existe un estado de deformación plana, es decir, los desplazamientos de los útiles que intervienen en el proceso de plegado son en función únicamente de dos ejes de coordenadas,  $x$  e  $y$ .

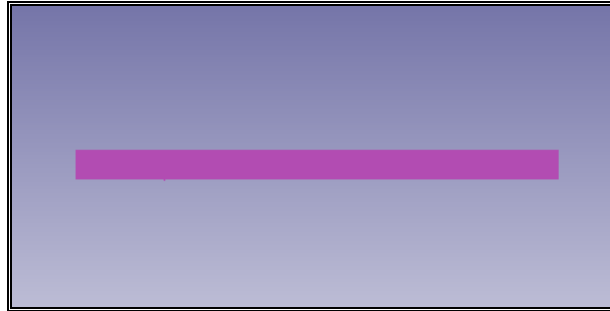
Se deduce de esto que la deformación en la dirección del eje  $z$  (perpendicular a los ejes  $x$  e  $y$ ) es cero ( $\epsilon_z=0$ ).

Conviene recordar no obstante, que en deformación plana  $\epsilon_z$  es cero, pero la tensión en la dirección del eje  $z$  ( $\sigma_z$ ) no lo es.

Al existir un estado de deformación plana se puede considerar como un problema bidimensional y el modelo se representa en dos dimensiones (2D). Los útiles que intervienen en el proceso de plegado están modelados con una sección constante que se alarga sobre el eje  $z$  una longitud igual a la unidad.

### 2.1.1. Chapa

La geometría utilizada para la chapa consiste en un rectángulo de en el que sus dimensiones dependen del espesor.



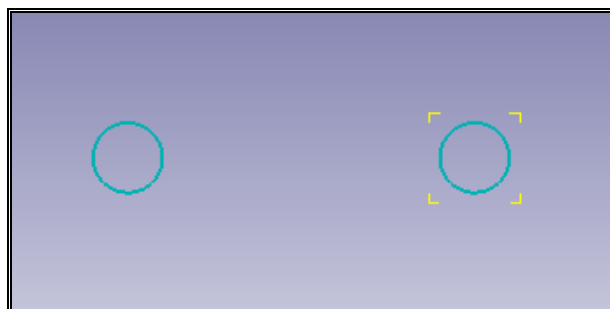
**Ilustración 5. Chapa**

| Espesor | Ancho de chapa |
|---------|----------------|
| 3 mm    | 50 mm          |
| 4 mm    | 100 mm         |
| 6 mm    | 100 mm         |

**Tabla 3. Anchos de chapa utilizados para cada espesor**

### 2.1.2. Matriz

Para definir la geometría de los apoyos de la chapa se ha tratado de simplificar ésta lo máximo posible, puesto que sólo nos interesa la zona de contacto directo con la chapa. Para ello se ha dispuesto la matriz como dos apoyos circulares de 3 mm de diámetro, que corresponden a los radios de acuerdo de la V de la matriz.



**Ilustración 6. Apoyos**

Se han utilizado diferentes aberturas para cada espesor de chapa. En la siguiente tabla se marca con una “X” las aberturas utilizadas para cada uno de los espesores anteriormente indicados:

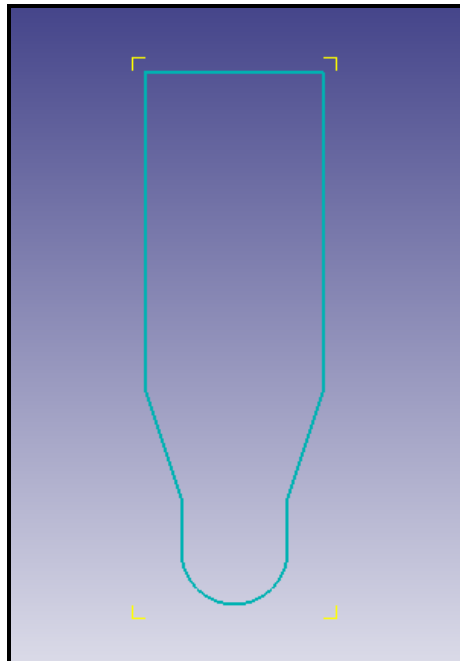
|         |      | Aberturas   |             |              |              |
|---------|------|-------------|-------------|--------------|--------------|
|         |      | 6 · espesor | 8 · espesor | 10 · espesor | 12 · espesor |
| Espesor | 3 mm |             | X           | X            | X            |
|         | 4 mm | X           | X           | X            | X            |
|         | 6 mm | X           | X           | X            |              |

**Tabla 4. Aberturas utilizadas para cada espesor de chapa**

### 2.1.3. Macho

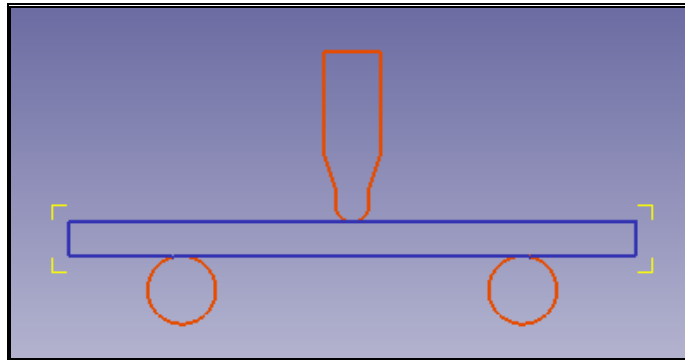
El macho consiste en una pieza cilíndrica dibujada en 2D, cuyo radio de punta es de aproximadamente 1’5 mm.

Para todos los casos el macho ha sido el mismo, ya que la variación del radio de punta no tiene influencia en la fuerza que ejerce el macho durante el plegado de la chapa.



**Ilustración 7. Macho**

El resultado final del modelo es el que sigue:



**Ilustración 8. Chapa, matriz y macho en DEFORM 2D**

## 2.2. Mallado: descripción y criterios

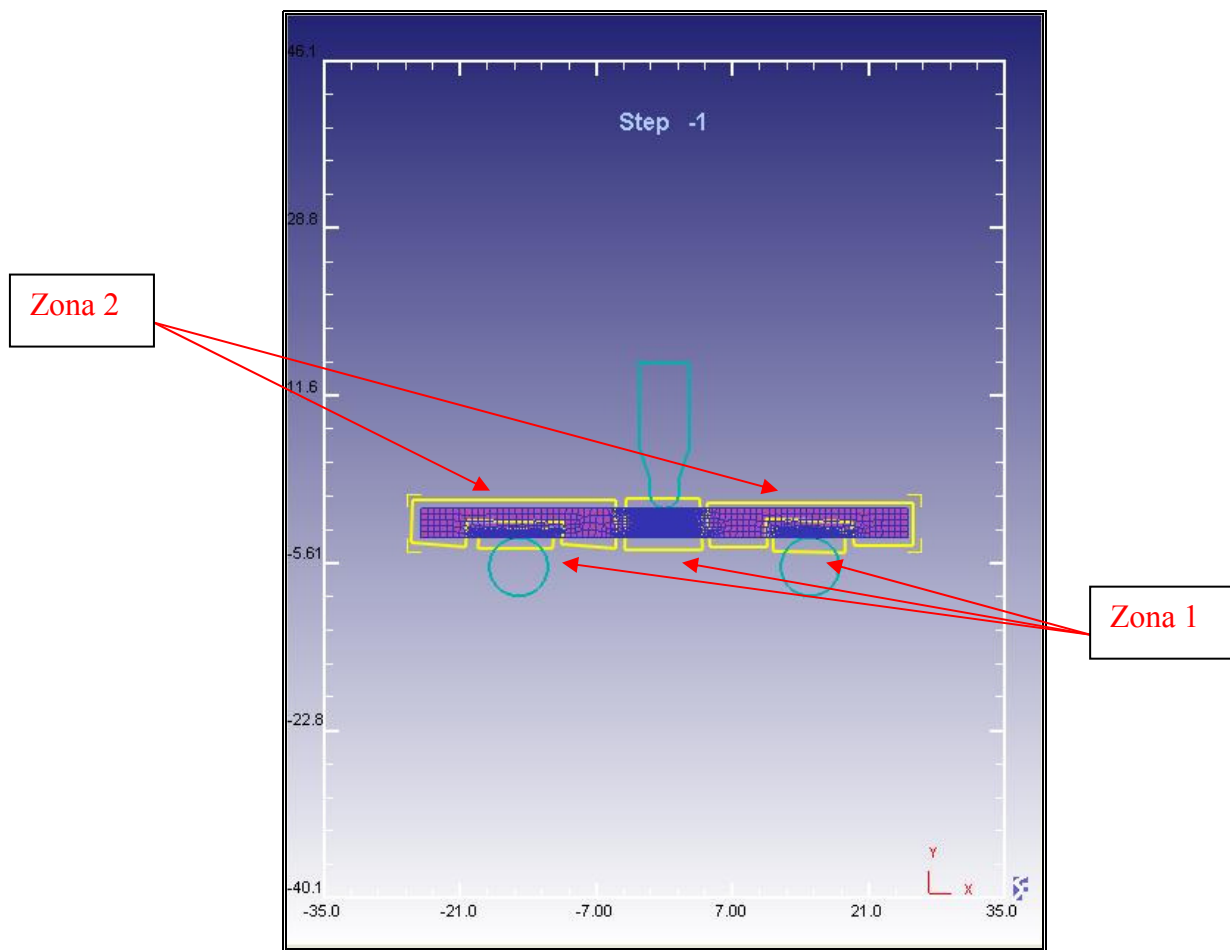
Se puede decir que mallar es el hecho de rellenar el modelo sólido con nodos y elementos.

La precisión de la solución está generalmente relacionada con el grado de refinamiento del mallado. Una malla más fina proporciona mayor precisión. Un modelo con mallado excesivamente grueso produce resultados muy pobres. En contrapartida, mallados finos, que producen buenos resultados, necesitan mucho tiempo de cálculo, mayor espacio para los ficheros, etc.

Idealmente, se puede decir, que no es conveniente mallar uniformemente el modelo, sino que las zonas donde se esperan mayores solicitaciones (mayores gradientes) deberían estar malladas más finamente que aquellas zonas menos solicitadas.

En este proyecto, la densidad de mallado está definida como número de elementos (también conocido como número de divisiones).

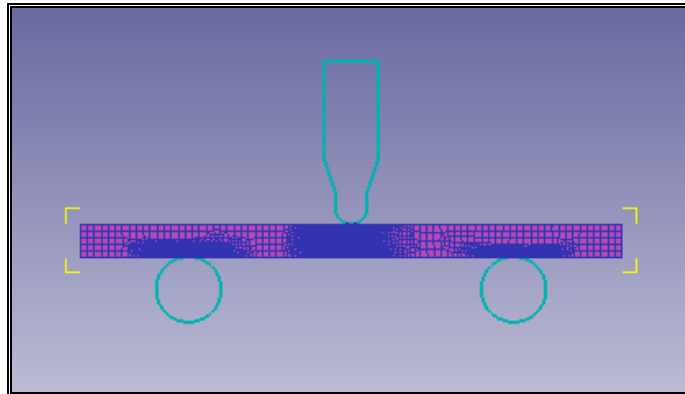
Para el modelo de plegado al aire en V mediante elementos finitos desarrollado, el único elemento que se ha mallado ha sido la chapa. Se ha utilizado una malla de 3000 elementos con dos zonas de mallado:



**Ilustración 9. Zonas de mallado**

La **zona 1** tiene unas dimensiones relativas de elemento igual a 0'01 y para la **zona 2** se ha utilizado unas dimensiones relativas de elemento de 0'5.

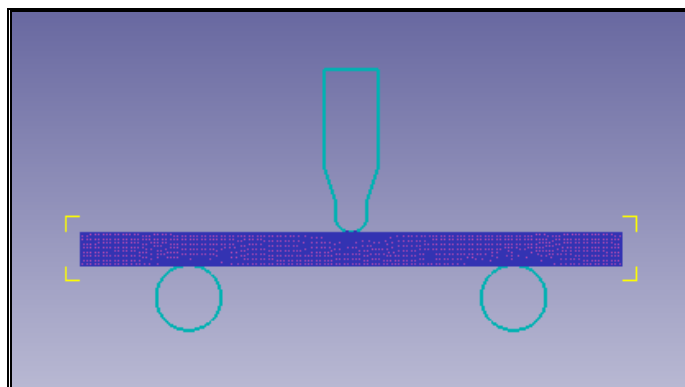
Se puede apreciar que la zona 1 abarca la parte central de la chapa, justo la parte por donde va a plegarse la chapa y que está en contacto con el macho, y las zonas donde la chapa apoya con la matriz.



**Ilustración 10. Resultado final de mallado**

Se ha elegido esta distribución ya que es importante que haya numerosos nodos en las zonas dónde hay contacto entre distintos elementos y dónde la chapa pliega, sin embargo no es necesario tener tantos nodos en las partes de la chapa que no intervienen en el proceso de plegado.

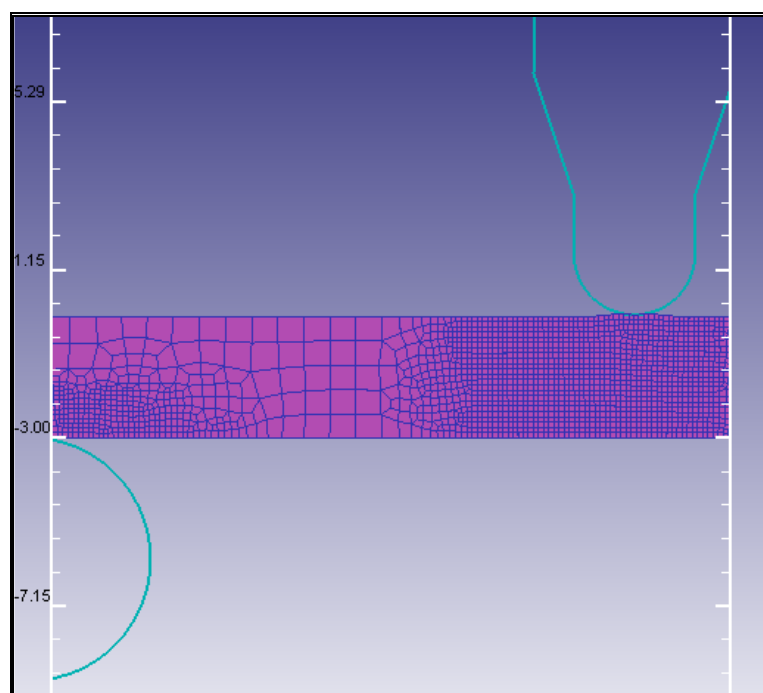
Podemos observar como sería un mallado sin utilizar distintos tamaños de elemento:



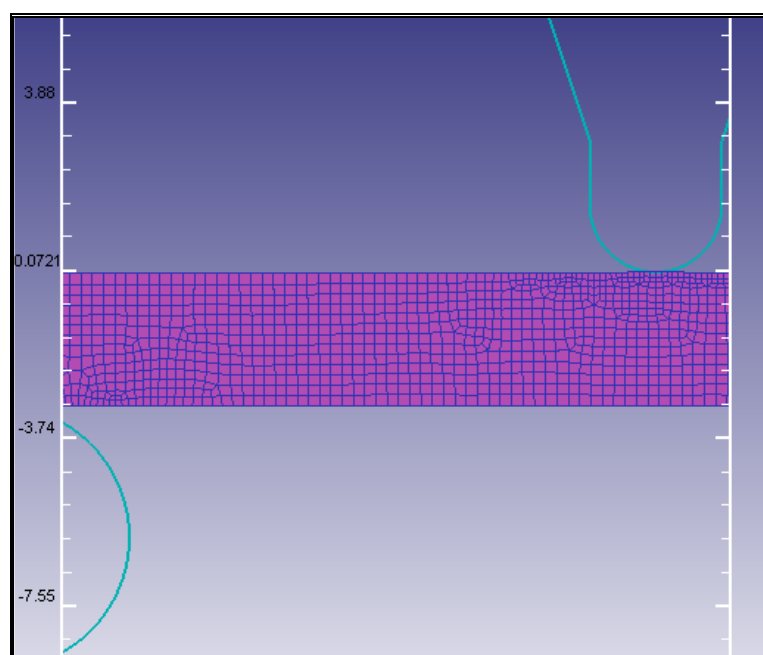
**Ilustración 11. Mallado uniforme**

En el siguiente zoom se aprecia la diferencia entre uno y otro caso.





**Ilustración 12. Zoom del mallado con distintas dimensiones del elemento de mallado**



**Ilustración 13. Zoom del mallado sin utilizar distintas formas de mallado**

En el apartado **2.8.** se estudia la sensibilidad del modelo dependiendo del número de elementos de mallado y se determina la utilización de 3000 elementos par todos los casos.

A la hora de definir la malla, es muy importante tener en cuenta el tipo de objeto que se selecciona en el programa DEFORM 2D. Nos da la posibilidad de escoger entre *Rigid*, *Plastic*, *Elastic*, *Porous* o *Elasto-Plastic*.

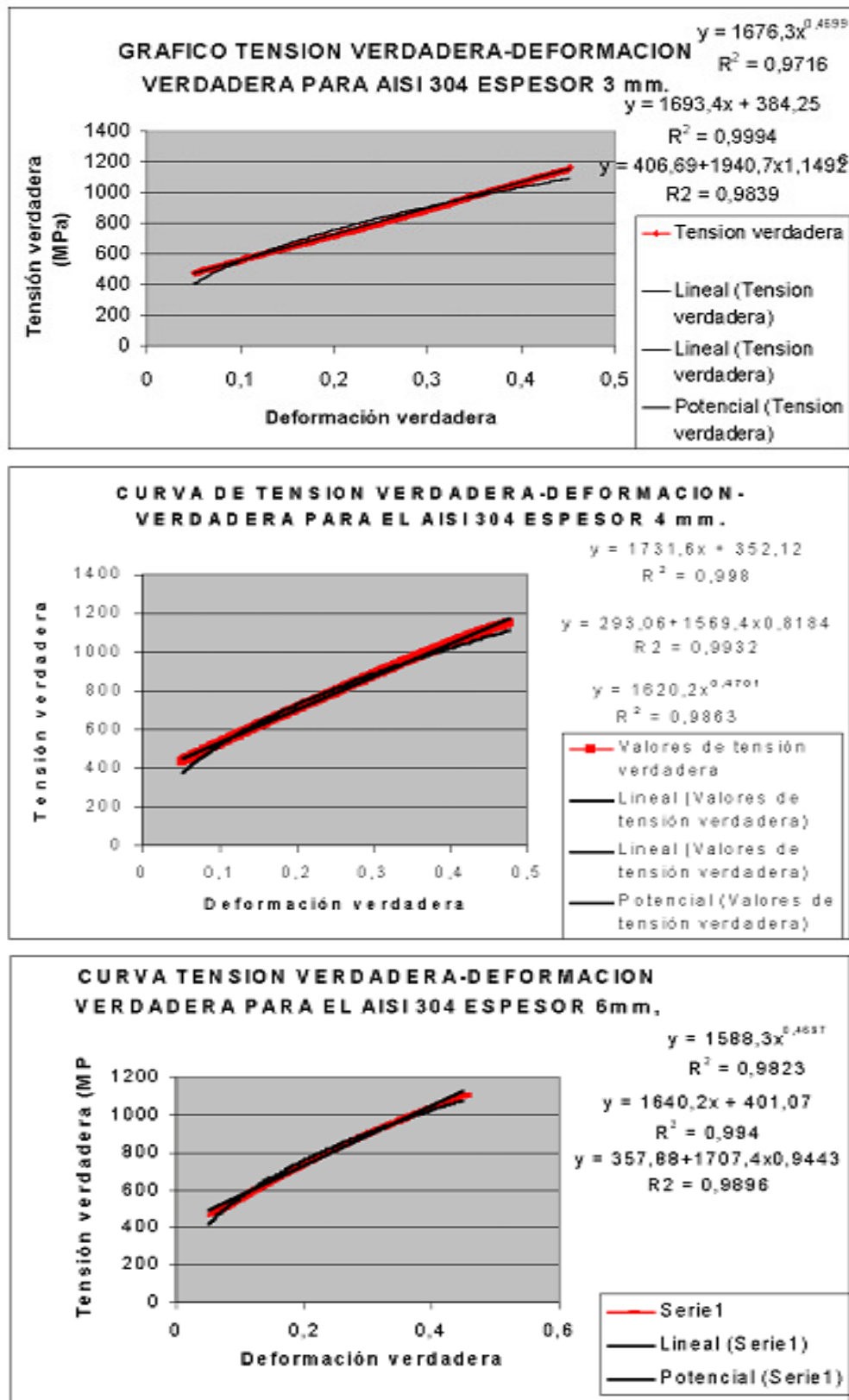
El empleado en este proyecto es el último, es decir, elasto-plástico. La razón es que el acero inoxidable AISI 304 posee en la realidad estas características. Al ser un plegado al aire, habrá algo de recuperación en la chapa, siendo el ángulo final de plegado mayor que el que tenemos en el momento de máximo descenso del macho. El material elasto-plástico de DEFORM-2D simula de manera adecuada la recuperación de la chapa al separarse del macho.

## **2.3. Material**

### **2.3.1. Chapa (Caracterización)**

Para cada diferente espesor de la chapa se ha debido caracterizar el material basándose en los valores de las curvas tensión-deformación de los ensayos reales en laboratorio.

La caracterización del material no incluye la influencia de la temperatura por ser ensayos a temperatura ambiente y ser lentos, lo que hace despreciable la elevación de temperatura por el calor generado mecánicamente. Esta misma pequeña velocidad de proceso implica la no afectación en la caracterización del material por la velocidad de deformación.



Gráfica 2. Curvas para las ecuaciones de caracterización

Para ello se ha incorporado en el programa DEFORM 2D las propiedades mecánicas del material AISI 304 en vez de las que el programa da por defecto, utilizando los valores que se adjuntan en las siguientes tablas:

| Espesor 3 mm |         |
|--------------|---------|
| Deformación  | Tensión |
| 0'00000      | 0       |
| 0'00181      | 344'9   |
| 0'10000      | 568'0   |
| 0'28000      | 951'9   |
| 0'46000      | 1163'7  |
| Espesor 4 mm |         |
| Deformación  | Tensión |
| 0'00000      | 0       |
| 0'00149      | 284'0   |
| 0'10000      | 549'0   |
| 0'28000      | 890'7   |
| 0'46000      | 1124'8  |
| Espesor 6 mm |         |
| Deformación  | Tensión |
| 0'00000      | 0       |
| 0'00169      | 322'0   |
| 0'10000      | 538'2   |
| 0'28000      | 873'2   |
| 0'51000      | 1180'7  |

**Tabla 5. Valores de las curvas tensión-deformación para 4 diferentes temperaturas y para los 4 diferentes espesores**

## 2.4. Condiciones de contorno (Movimientos y fijaciones)

### 2.4.1. Chapa

A la chapa no se le pone ninguna restricción de movimiento, para que pueda ser deformada por el punzón o macho. Su movimiento vendrá condicionado por los apoyos de la matriz.

### 2.4.2. Matriz

A la matriz se le impondrá una restricción de movimiento para que no pueda moverse y así provocar el plegado de la chapa cuando ésta sea empujada por el macho.

### 2.4.3. Macho

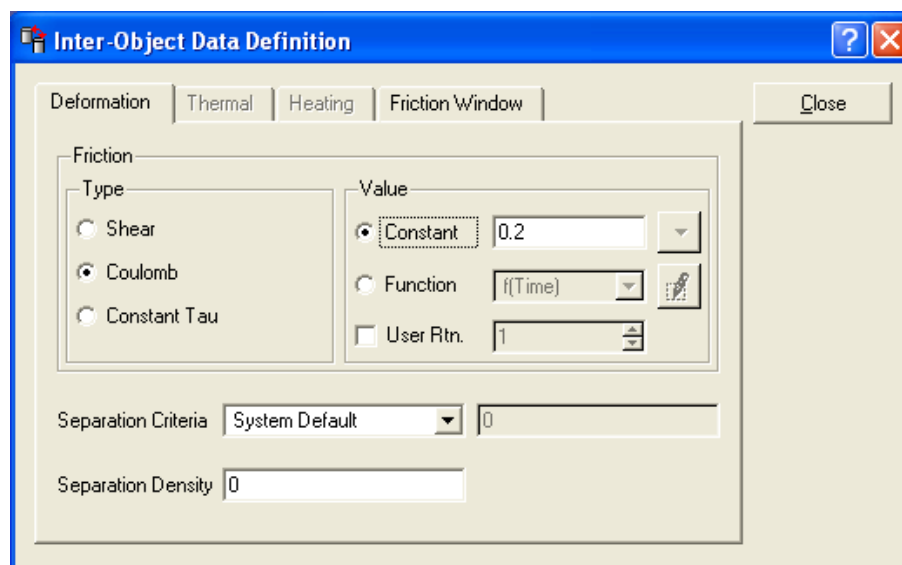
Se le da un movimiento vertical en sentido descendente y se le restringe el movimiento en el plano horizontal. Así conseguimos que el plegado de la chapa sea siempre en el centro de la misma.

## 2.5. Elementos de contacto

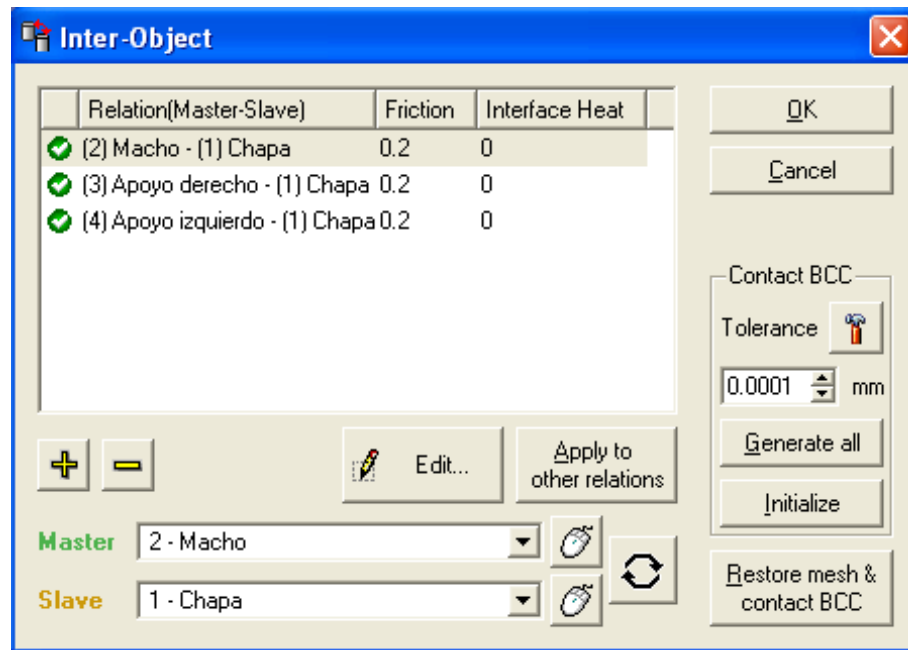
Al haber contacto entre distintos elementos en el proceso de plegado, se va a producir una fuerza de rozamiento. Por ello hay que prever de un factor de rozamiento entre macho-chapa, apoyo izquierdo-chapa y apoyo derecho-chapa.

Este factor de rozamiento será asignado en DEFORM como una constante de Coulomb, que varía entre 0'15 y 0'4.

A la hora de comenzar a realizar los primeros ensayos de plegado en el programa informático, se utiliza en todos los casos un coeficiente de rozamiento de 0'3.



**Ilustración 14. Definición del coeficiente de rozamiento**

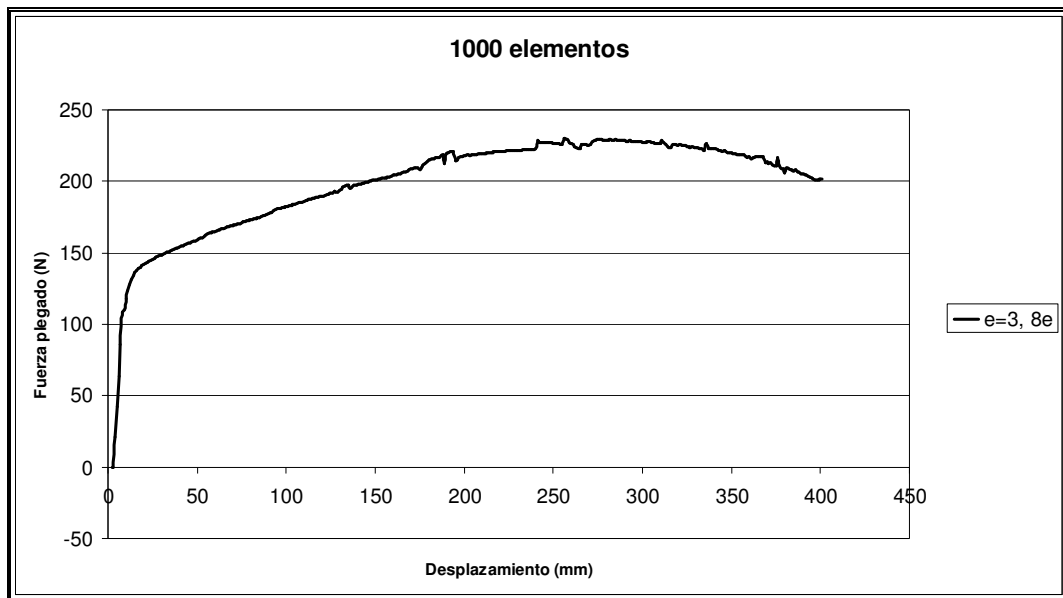


**Ilustración 15. Relación entre objetos**

## 2.6. Resultados iniciales del modelo

### 2.6.1. Fuerza

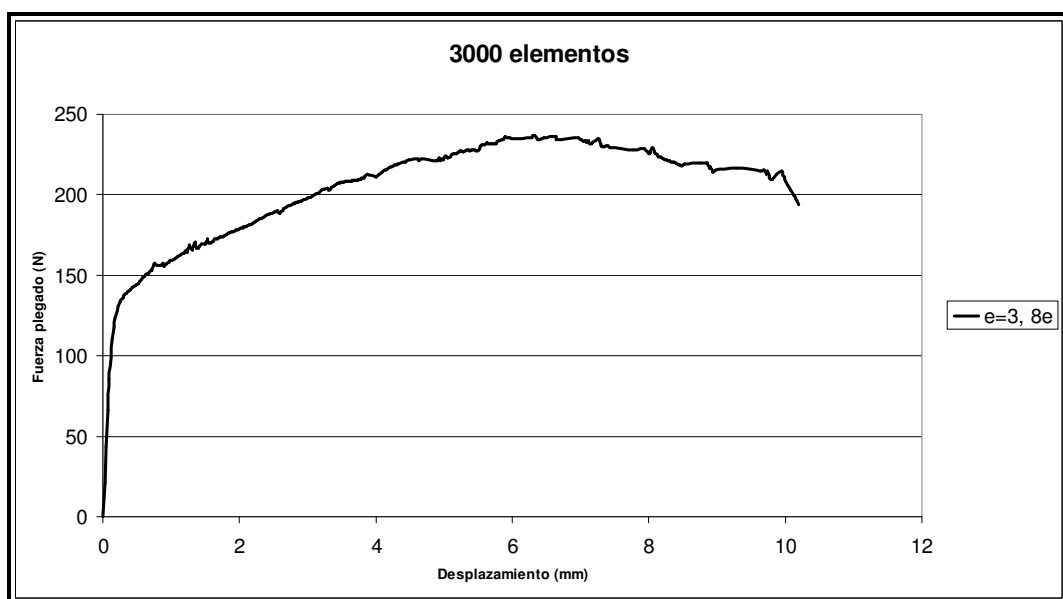
El primer resultado obtenido fue la fuerza del macho frente al desplazamiento del mismo para un espesor de 3 mm de la chapa y una abertura de la matriz de 8 veces el espesor. Como comienzo de los trabajos en DEFORM, se utilizó un mallado de 1000 elementos.



**Gráfica 3. Fuerza de plegado para un mallado de 1000 elementos**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 229 |
|------------------------------|-----|

Posteriormente se procedió a aumentar el número de elementos de mallado para ajustar lo máximo posible el modelo a la realidad. Como se verá en el siguiente apartado, el número de elementos usado para todos los casos es de 3000.



**Gráfica 4. Fuerza de plegado para un mallado de 3000 elementos**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 235 |
|------------------------------|-----|

## 2.7. Sensibilidad del modelo

Se entiende como sensibilidad del modelo a la relación entre las variaciones relativas de la fuerza y al del parámetro sobre el que se considera la sensibilidad.

### 2.7.1. Al tamaño de los elementos

En este apartado se estudia la influencia que tiene el número de elementos en el mallado en la fuerza necesaria para conseguir el plegado de la chapa.

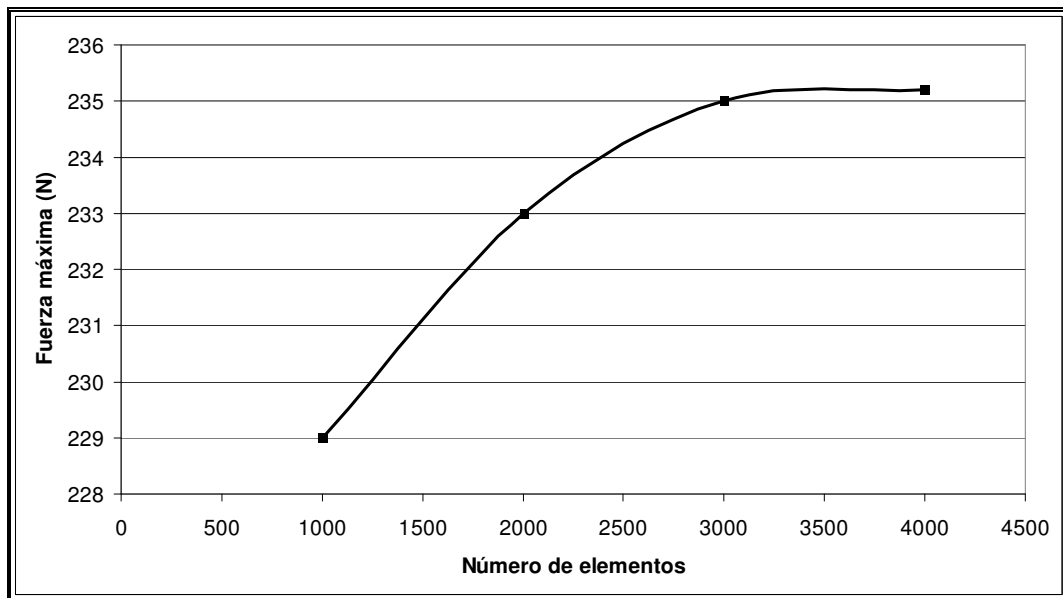
Se trata de ajustar lo máximo posible el modelo y para ello necesitamos conocer la variación de la fuerza de plegado con el aumento del número de elementos.

A continuación observamos la fuerza máxima obtenida para cada número de elementos:

| Nº de elementos | Fuerza máxima |
|-----------------|---------------|
| 1000            | 229 N         |
| 2000            | 233 N         |
| 3000            | 235 N         |
| 4000            | 235'2 N       |

**Tabla 6. Fuerza máxima obtenida para cada densidad de mallado**





**Gráfica 5. Fuerza máxima de plegado frente al nº de elementos del mallado**

Se aprecia que a partir de 3000 elementos la fuerza no varía apenas al aumentar el número de elementos.

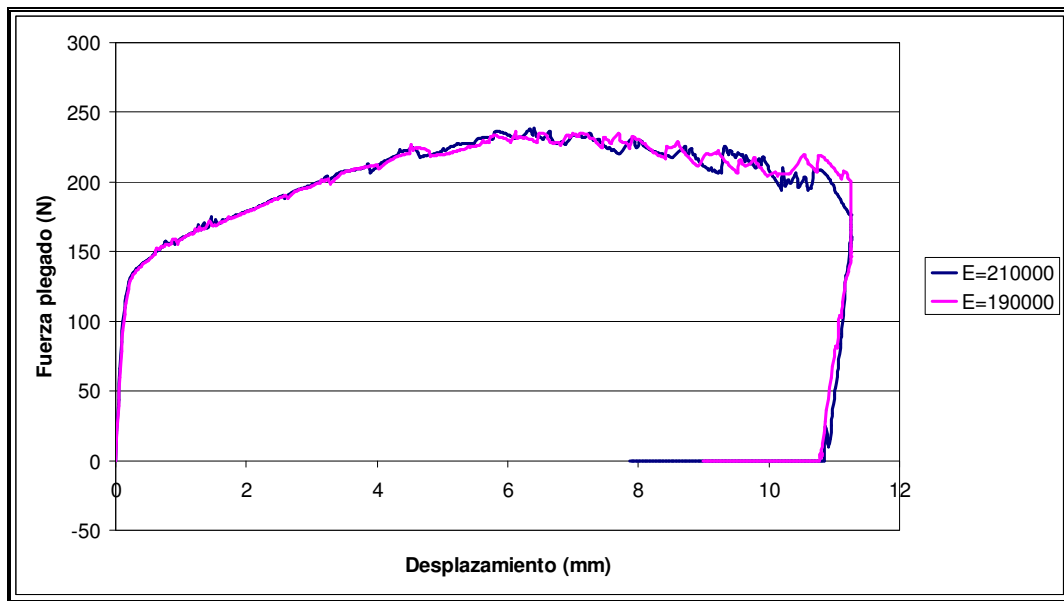
Para todos los casos realizados en DEFORM se utilizará un número de elementos igual a 3000, ya que trabajar con 3000 elementos permite optimizar mucho el tiempo de plegado en DEFORM y se consiguen prácticamente los mismos resultados que si se utilizan 4000 elementos.

### 2.7.2. Al módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad tiene una influencia muy pequeña en la variación de la fuerza de plegado.

Para  $E=210000$  MPa la fuerza de plegado es de 235 N y para  $E=190000$  MPa la fuerza es de 234 N. Esto supone:

| % Variación Módulo de elasticidad | % Variación Fuerza máxima plegado | Sensibilidad |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| 9'52                              | 0'42                              | 0'04         |



**Gráfica 6. Sensibilidad del módulo de elasticidad**

La fuerza de plegado varía un 4% de la variación del módulo de elasticidad, por lo que la variación de la fuerza de plegado con el módulo de elasticidad es muy reducida.

En lo sucesivo y de acuerdo con la literatura especializada que utiliza valores en el entorno de 200.000 MPa se utilizará el valor de 195.000 MPa.

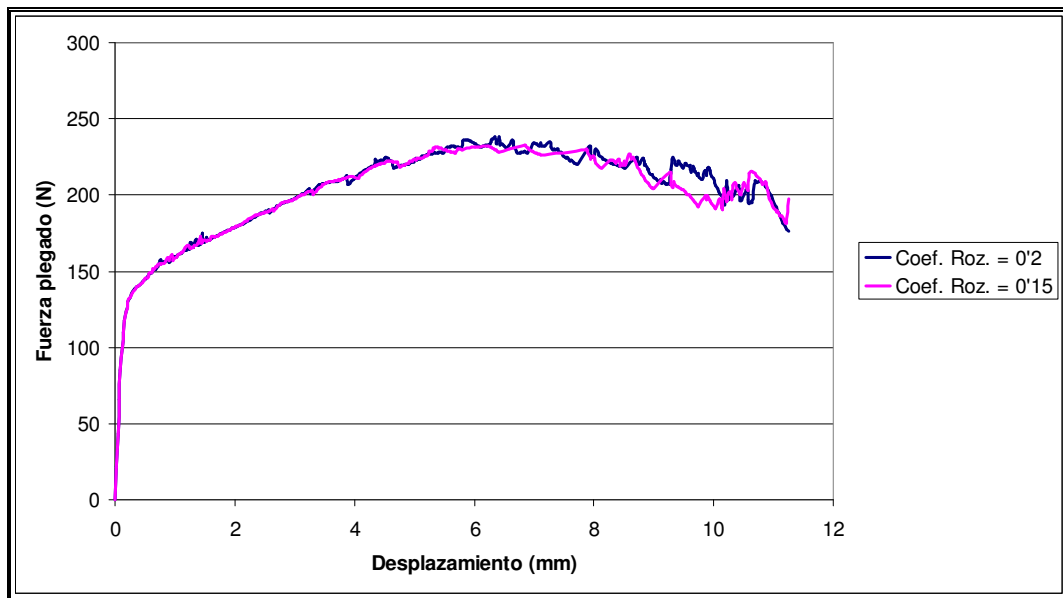
Más adelante se estudiará la repercusión en la recuperación del material.

### 2.7.3. Al coeficiente de rozamiento

Con un  $\mu=0'2$  se obtiene una fuerza máxima de 235 N y con un  $\mu=0'15$  el resultado de la fuerza máxima de plegado es de 230 N.

| % Variación del coeficiente de rozamiento | % Variación Fuerza máxima plegado | Sensibilidad |
|---|-----------------------------------|--------------|
| 25  | 2'13                              | 0'0852       |

La fuerza de plegado varía un 8'52% de la variación del coeficiente de rozamiento.



**Gráfica 7. Sensibilidad del coeficiente de rozamiento.**

#### 2.7.4. Al radio de punta

Como se verá más adelante el modelo no incorpora como variable el radio de punta del macho, habida cuenta de su prácticamente nula influencia sobre los resultados del plegado, dentro de su gama de variación de 0 a 6 mm.

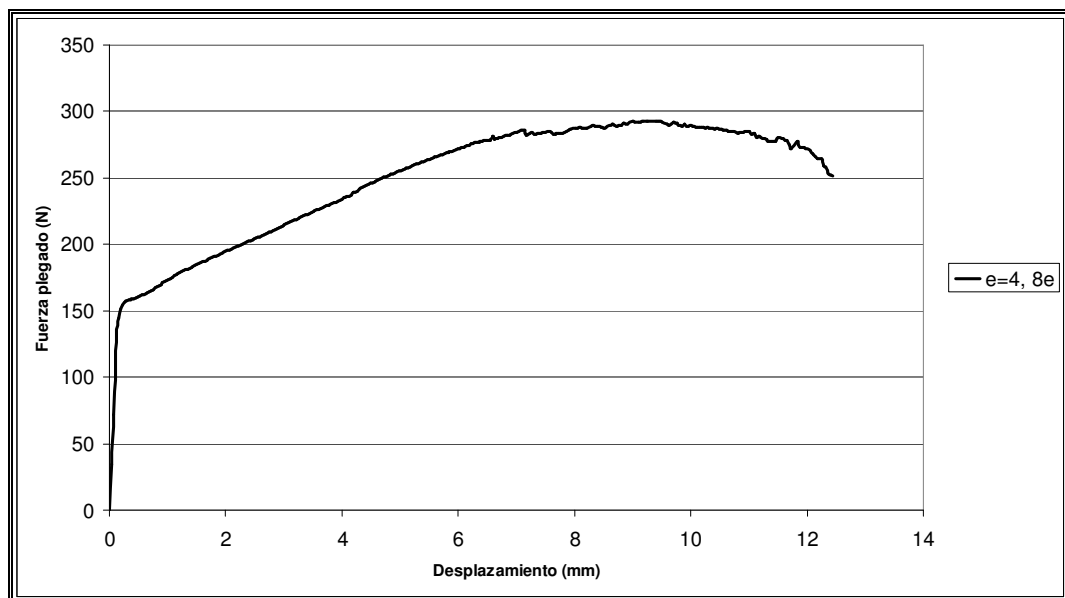
### 3. EXTENSIONES DEL MODELO

#### 3.1. A otros espesores

Se utilizan otros lotes de material, con espesores 4 mm y 6 mm. Los valores de fuerza obtenidos son superiores a los necesarios para plegar una chapa de 3 mm, como cabe esperar.

Los resultados iniciales de fuerza son los obtenidos a continuación:

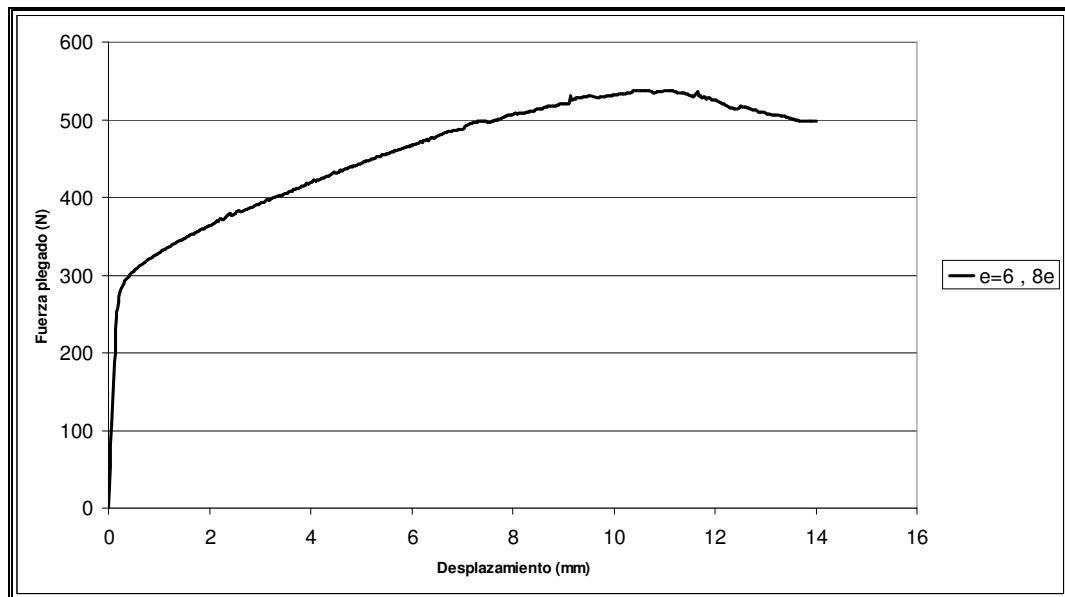
- Espesor 4 mm



**Gráfica 8. Fuerza plegado espesor 4, abertura 8·espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 290 |
|------------------------------|-----|

- Espesor 6 mm



**Gráfica 9. Fuerza plegado espesor 6, abertura 8·espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 535 |
|------------------------------|-----|

### 3.2. A otras aberturas

Se extiende el modelo a otras aberturas de la matriz. Se recuerda la Tabla 4, dónde se muestra esquemáticamente las utilizadas para cada espesor de chapa.

|         |      | Aberturas   |             |              |              |
|---------|------|-------------|-------------|--------------|--------------|
|         |      | 6 · espesor | 8 · espesor | 10 · espesor | 12 · espesor |
| Espesor | 3 mm |             | <b>X</b>    | <b>X</b>     | <b>X</b>     |
|         | 4 mm | <b>X</b>    | <b>X</b>    | <b>X</b>     | <b>X</b>     |
|         | 6 mm | <b>X</b>    | <b>X</b>    | <b>X</b>     |              |

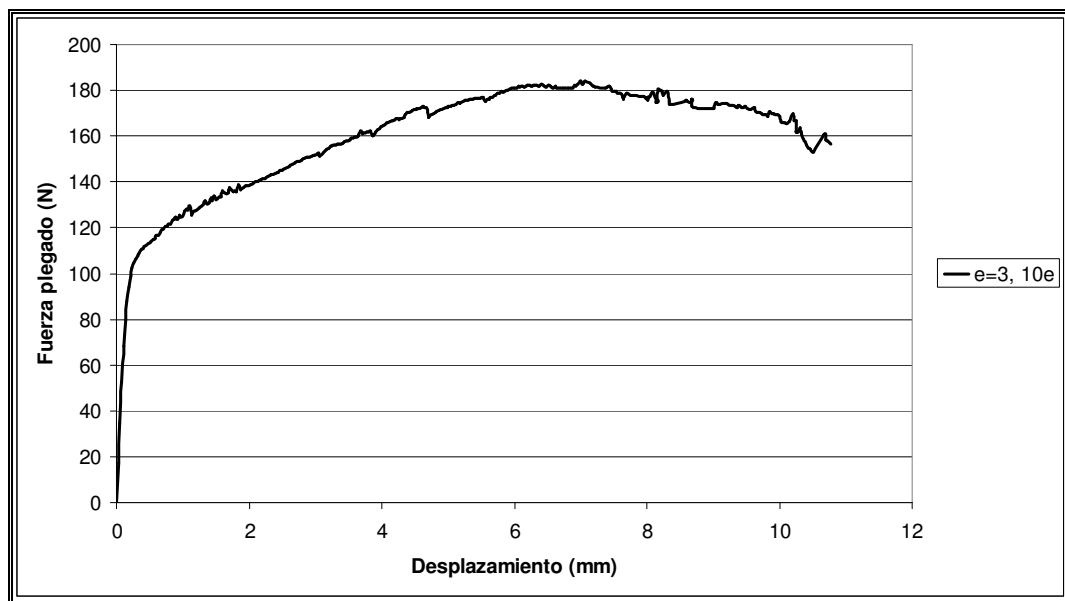
**Tabla 4. Aberturas utilizadas para cada espesor de chapa**

A modo de aclaración, decir que las aberturas utilizadas para el espesor 3, al ser las de 8, 10 y 12 veces el propio espesor, las aberturas serán de 24 mm, 30 mm y 36 mm.

Se observa con facilidad que cuando menor es la abertura de la matriz, mayor fuerza debe hacer el macho para plegar la chapa. También que a mayor abertura, mayor recorrido tiene que hacer el macho para plegar la chapa.

### ESPESOR 3 mm

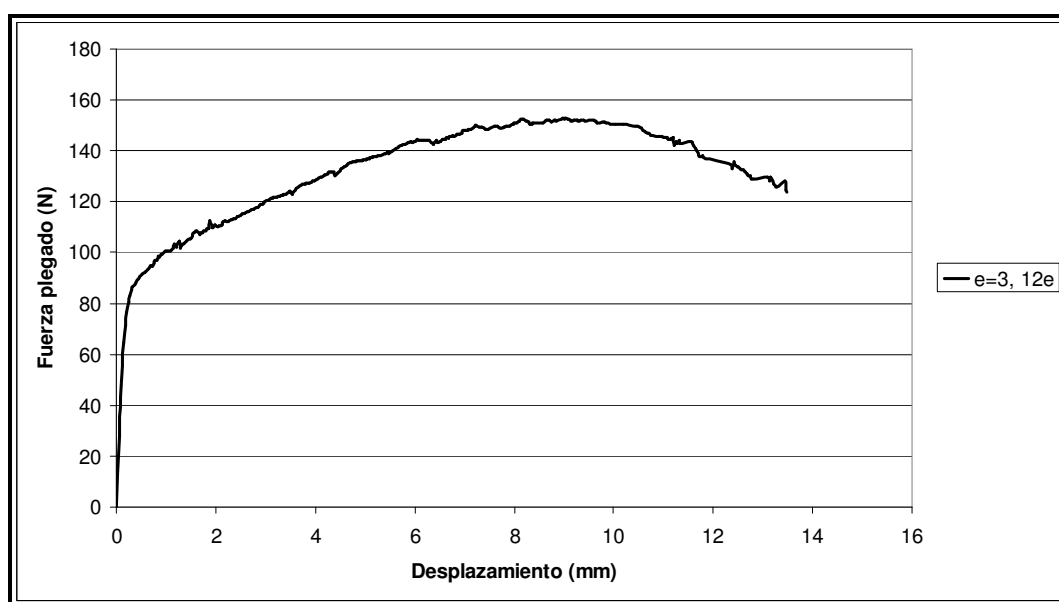
- Abertura de valor 10 veces el espesor



**Gráfica 10. Fuerza plegado espesor 3, abertura 10-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 182 |
|------------------------------|-----|

- Abertura de 12 veces el espesor

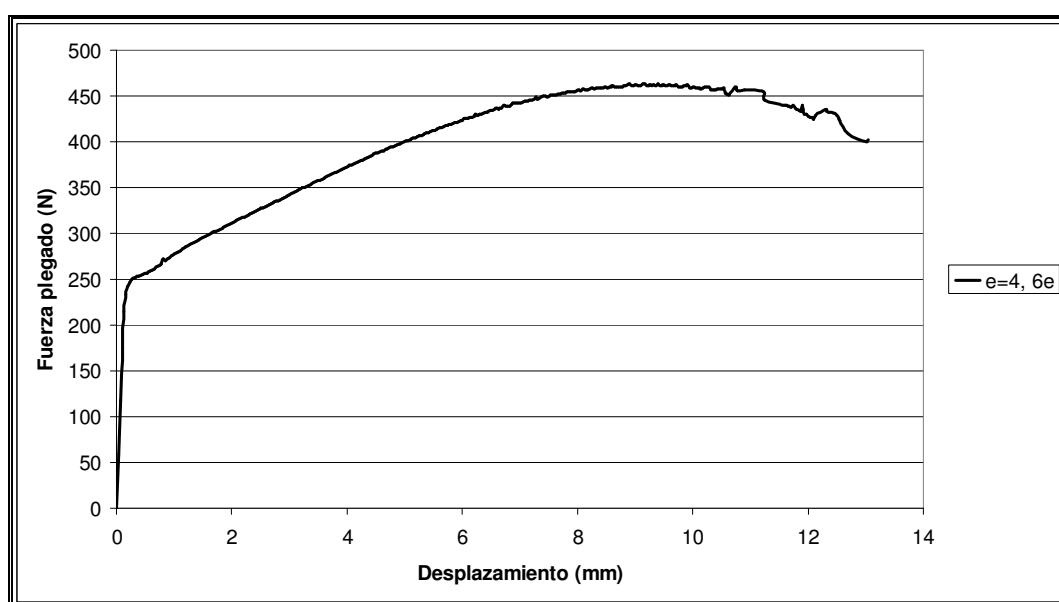


**Gráfica 11. Fuerza plegado espesor 3, abertura 12·espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 150 |
|------------------------------|-----|

### ESPESOR 4 mm.

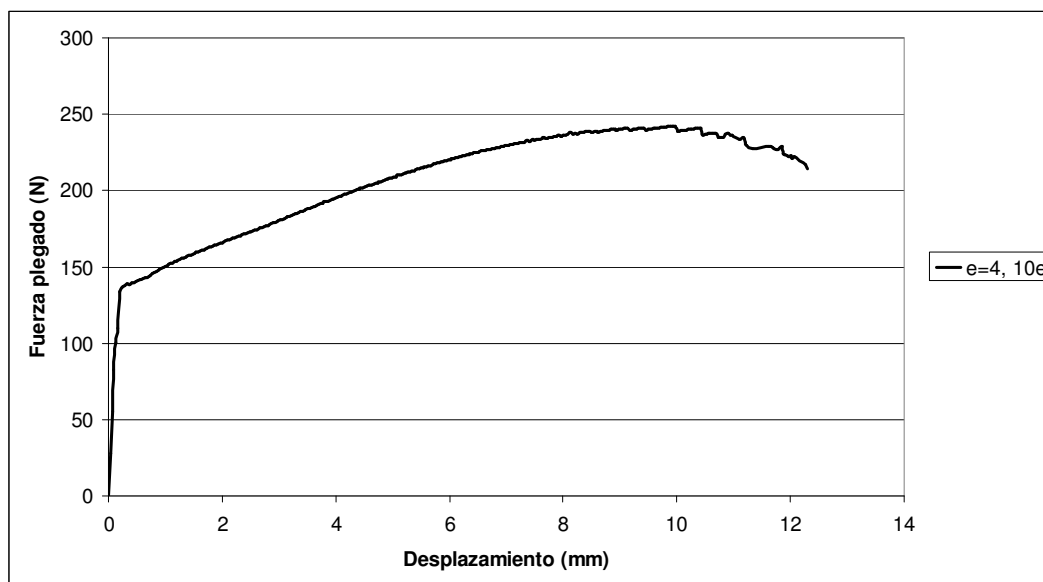
- Abertura de 6 veces el espesor



**Gráfica 12. Fuerza plegado espesor 4, abertura 6·espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 460 |
|------------------------------|-----|

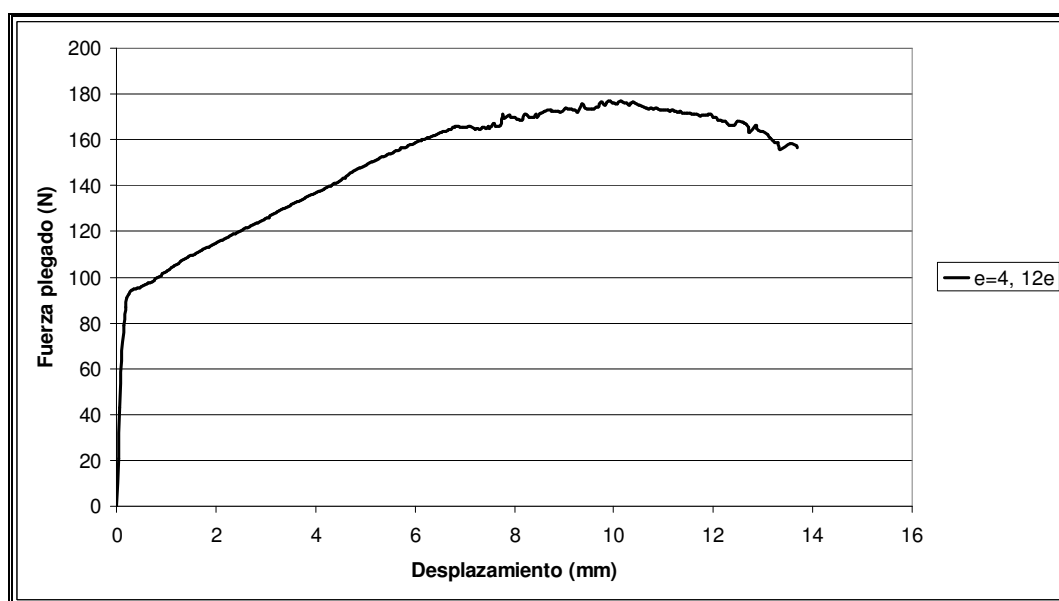
- Abertura de 10 veces el espesor



**Gráfica 13. Fuerza plegado espesor 4, abertura 10·espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 240 |
|------------------------------|-----|

- Abertura de 12 veces el espesor



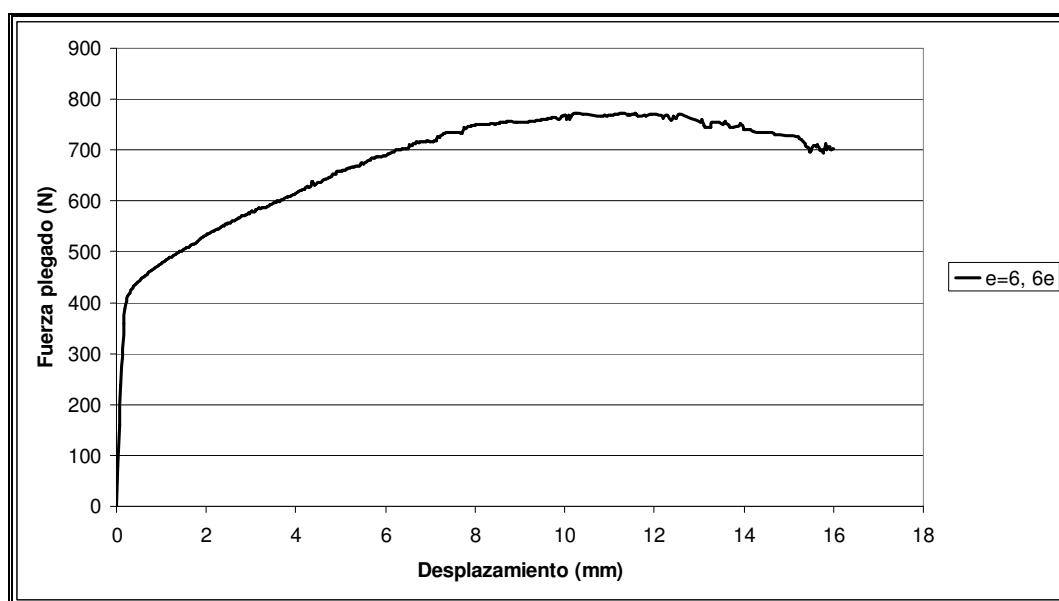
**Gráfica 14. Fuerza plegado espesor 4, abertura 12·espesor**



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 176 |
|------------------------------|-----|

### ESPESOR 6 mm.

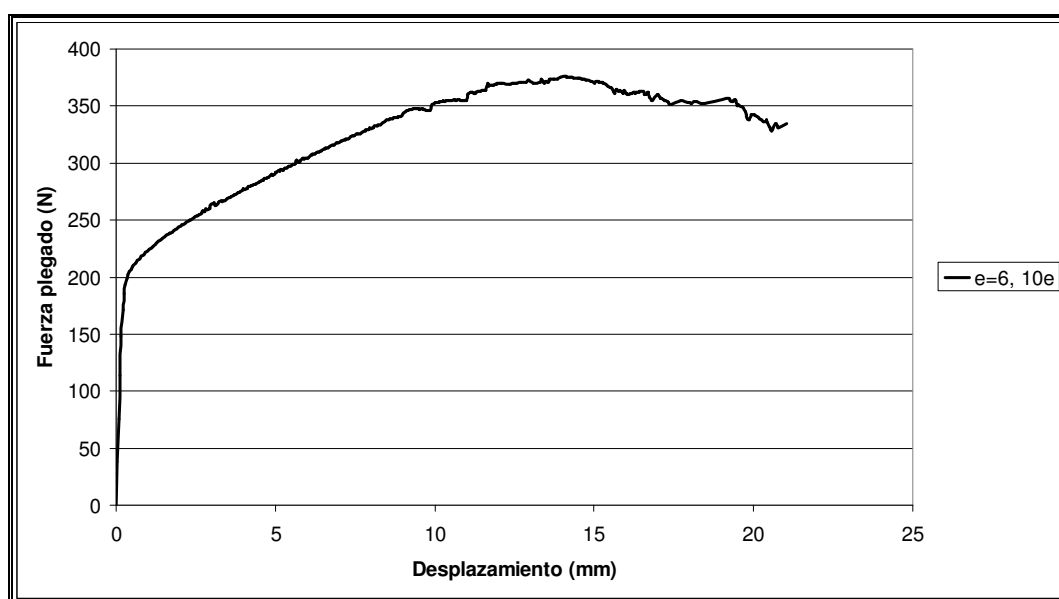
- Abertura de 6 veces el espesor



**Gráfica 15. Fuerza plegado espesor 6, abertura 6-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 770 |
|------------------------------|-----|

- Abertura de 10 veces el espesor



**Gráfica 16. Fuerza plegado espesor 6, abertura 10·espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 375 |
|------------------------------|-----|

## 4. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

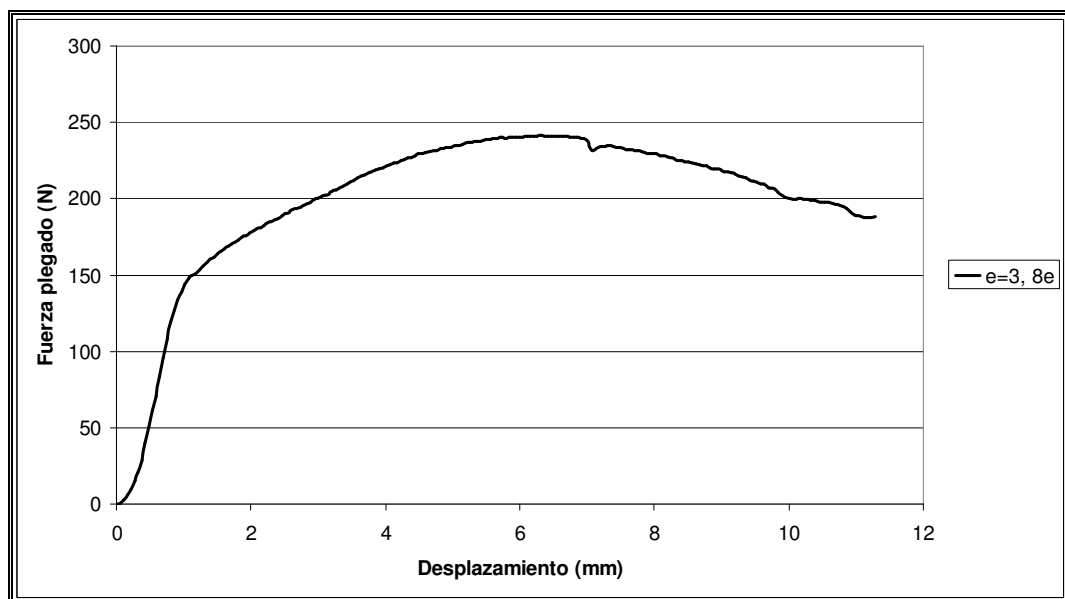
### 4.1. Resultados ensayos reales en fuerza

Se realizaron ensayos de plegado en probetas de acero inoxidable austenítico AISI-304 de espesores 3, 4 y 6 mm.

Se realizaron mediante plegado al aire en V, a temperatura ambiente, con matriz en forma de U. Los valores de fuerza frente a desplazamiento obtenidos se muestran a continuación:

#### ESPESOR 3 mm.

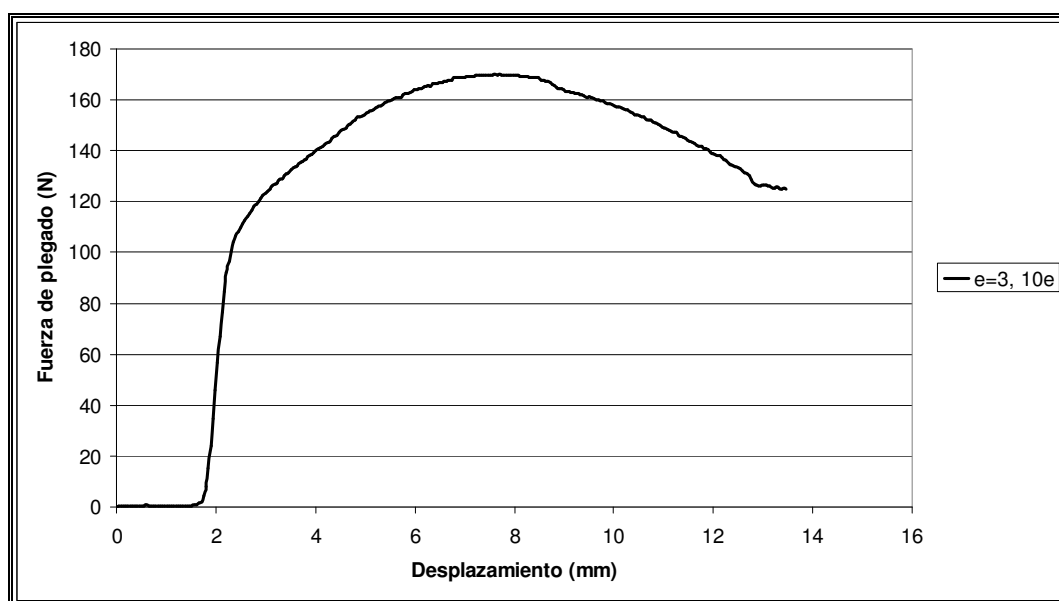
- Abertura de valor 8 veces el espesor



**Gráfica 37. Ensayo real fuerza, espesor 3, abertura 8·espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 240 |
|------------------------------|-----|

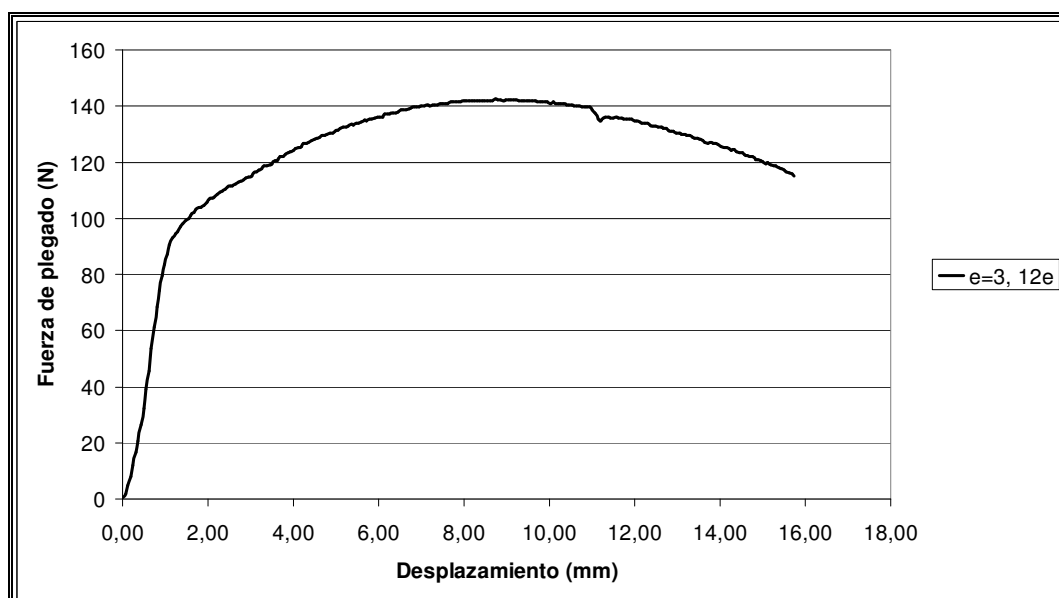
- Abertura de valor 10 veces el espesor



**Gráfica 18. Ensayo real fuerza, espesor 3, abertura 10-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 170 |
|------------------------------|-----|

- Abertura de valor 12 veces el espesor

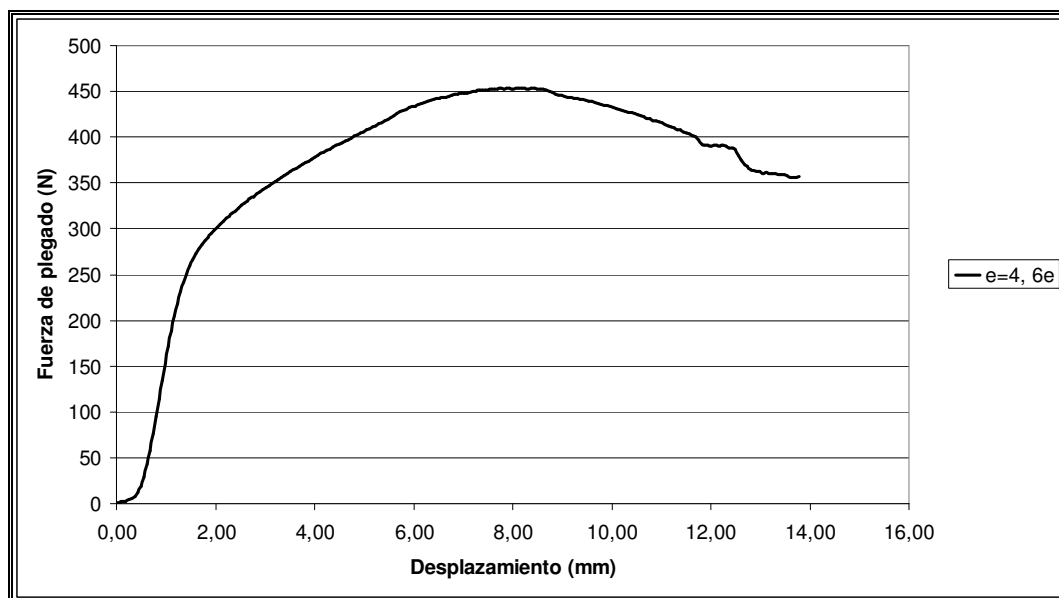


**Gráfica 19. Ensayo real fuerza, espesor 3, abertura 12-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 142 |
|------------------------------|-----|

## ESPESOR 4 mm.

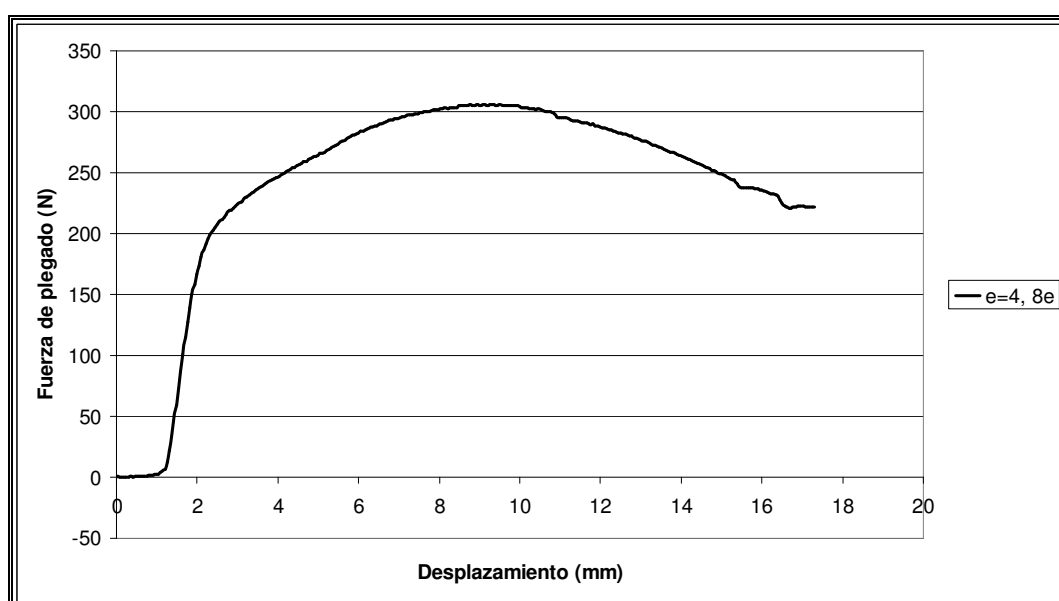
- Abertura de valor 6 veces el espesor



**Gráfica 20. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 6-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 451 |
|------------------------------|-----|

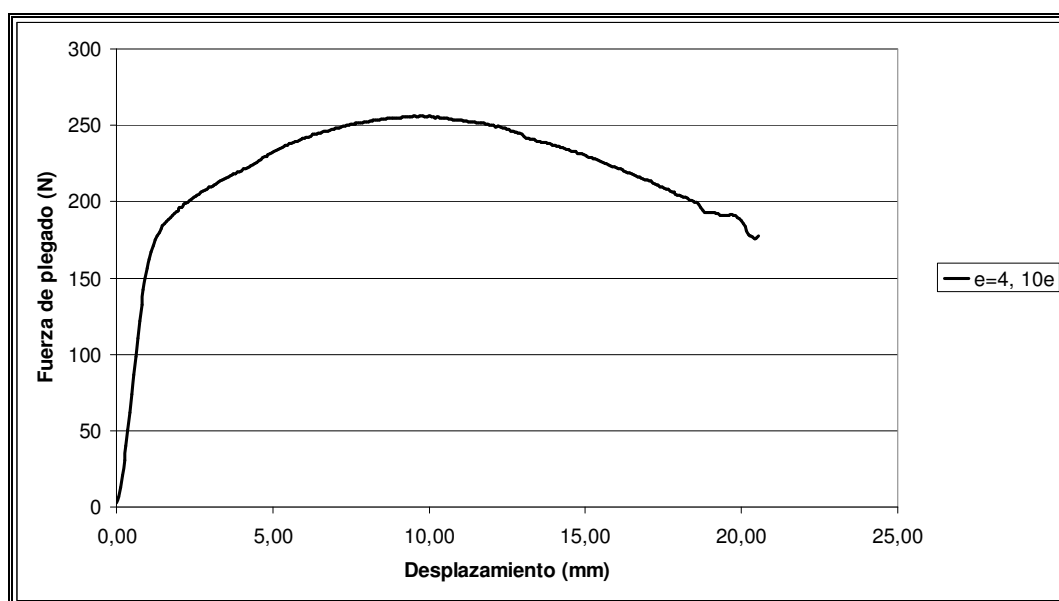
- Abertura de valor 8 veces el espesor



**Gráfica 21. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 8-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 305 |
|------------------------------|-----|

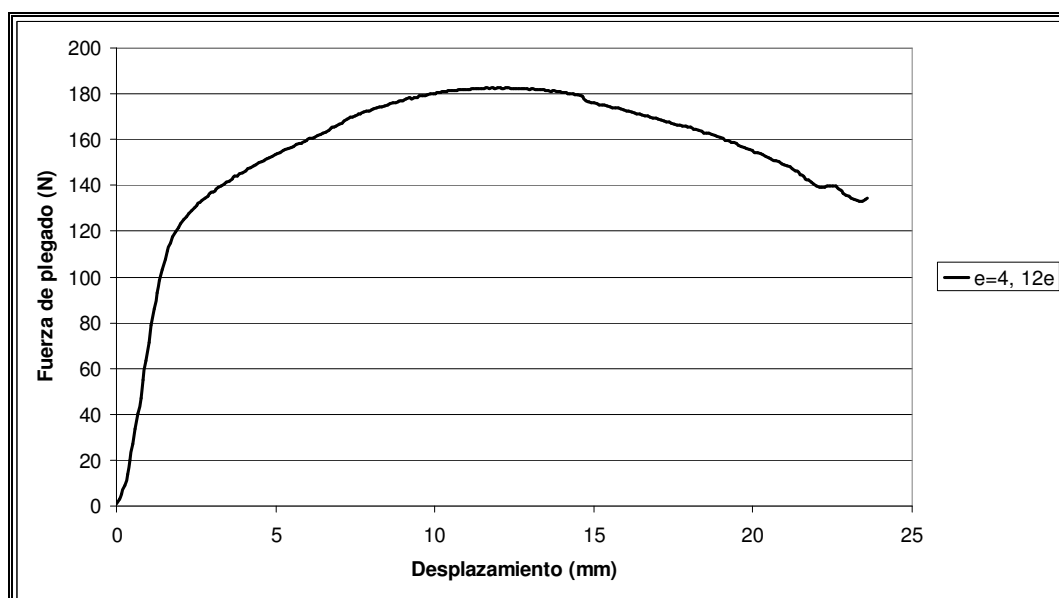
- Abertura de valor 10 veces el espesor



**Gráfica 22. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 10-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 253 |
|------------------------------|-----|

- Abertura de valor 12 veces el espesor

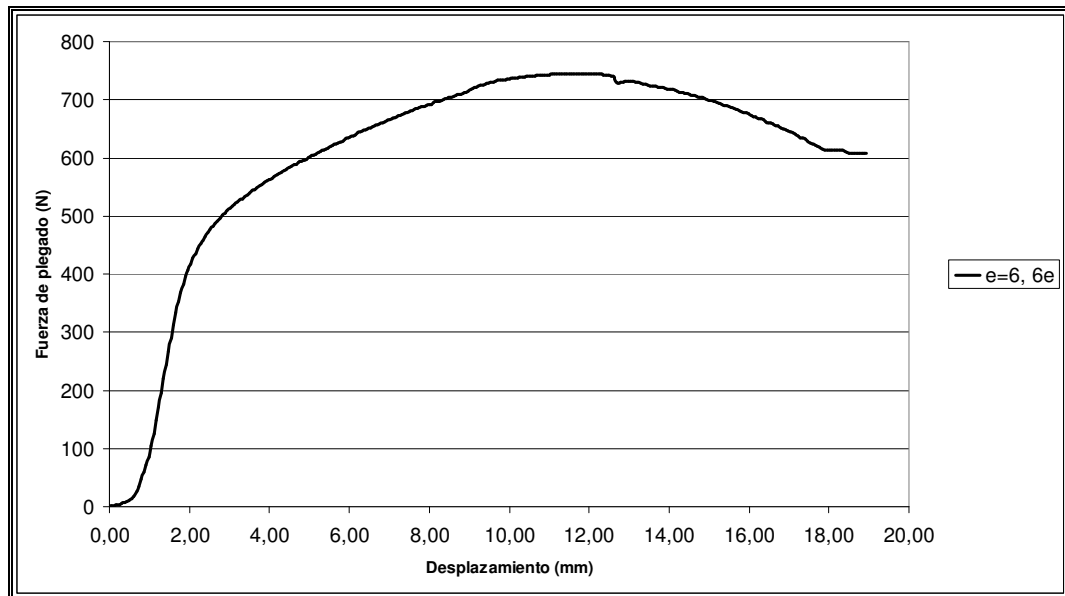


**Gráfica 23. Ensayo real fuerza, espesor 4, abertura 12-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 183 |
|------------------------------|-----|

## ESPESOR 6 mm.

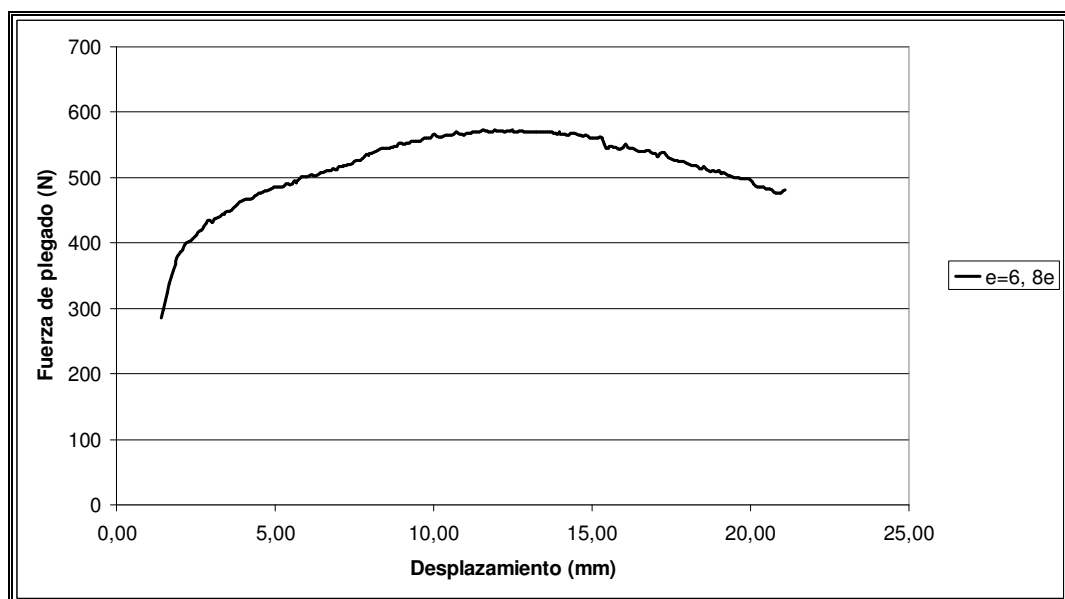
- Abertura de valor 6 veces el espesor



**Gráfica 24. Ensayo real fuerza, espesor 6, abertura 6-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 744 |
|------------------------------|-----|

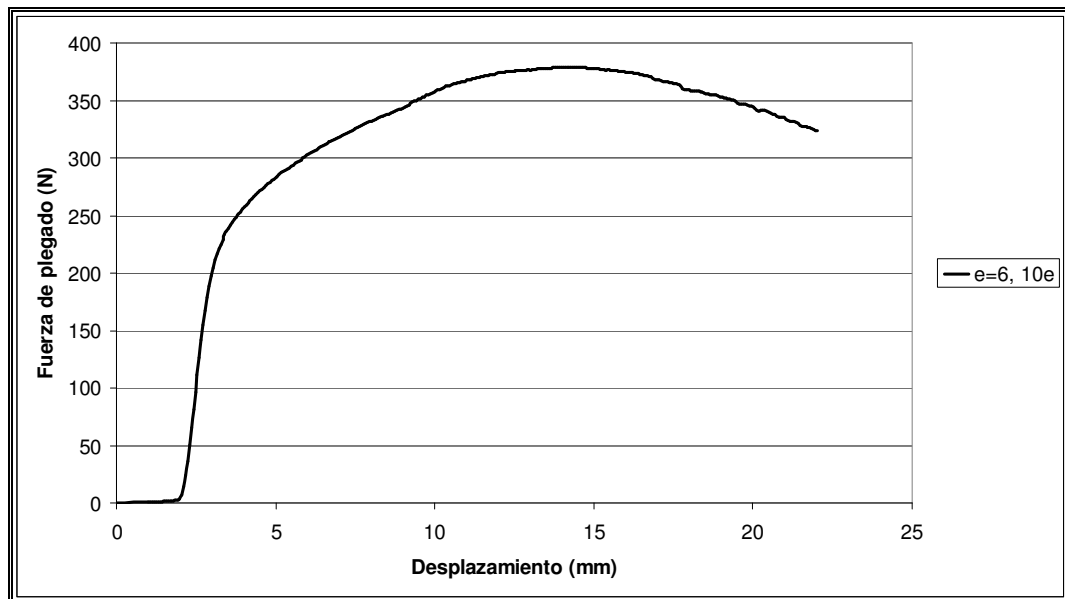
- Abertura de valor 8 veces el espesor



**Gráfica 25. Ensayo real fuerza, espesor 6, abertura 8-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 571 |
|------------------------------|-----|

- Abertura de valor 10 veces el espesor



**Gráfica 26. Ensayo real fuerza, espesor 6, abertura 10-espesor**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Fuerza máxima de plegado [N] | 378 |
|------------------------------|-----|

## 4.2. Optimización del modelo por ajustes de parámetros

Como se mencionó en el apartado 2.6. del presente trabajo, los valores de los coeficientes de rozamiento utilizados en los ensayos iniciales es de valor  $\mu = 0.3$ .

Dependiendo de la diferencia del valor de la fuerza máxima de plegado de los ensayos reales y de los obtenidos en el programa informático, se ajustará con nuevos valores el coeficiente de rozamiento para conseguir que el modelo se aproxime lo máximo posible a la realidad.



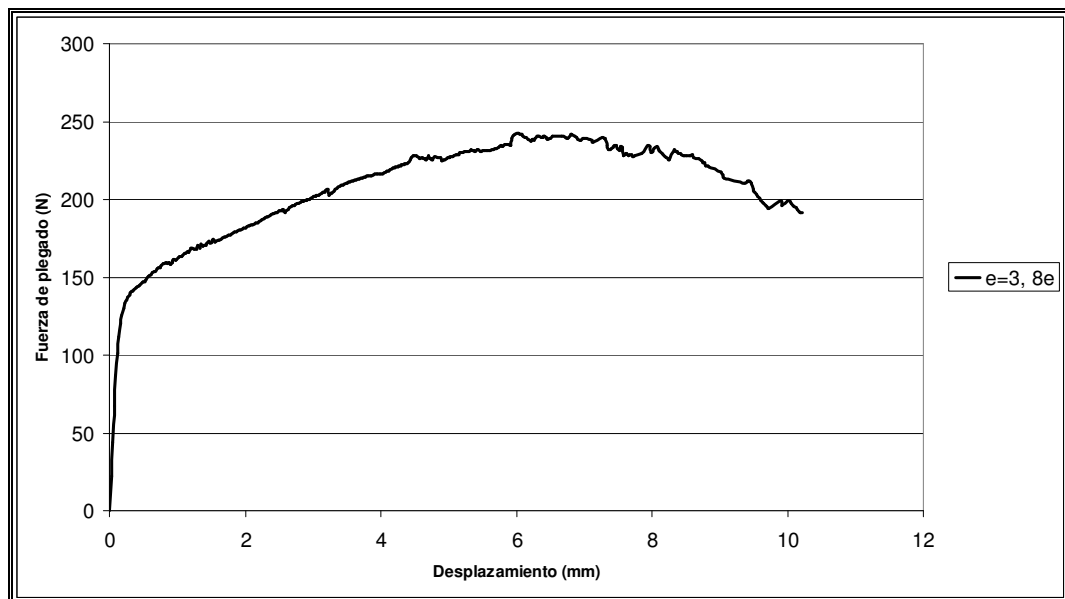
## ESPESOR 3 mm

- Abertura  $8 \cdot e = 24$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 235                            | 240            |

|   |       |
|---|-------|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'375 |
|---|-------|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 240 |
|---|-----|



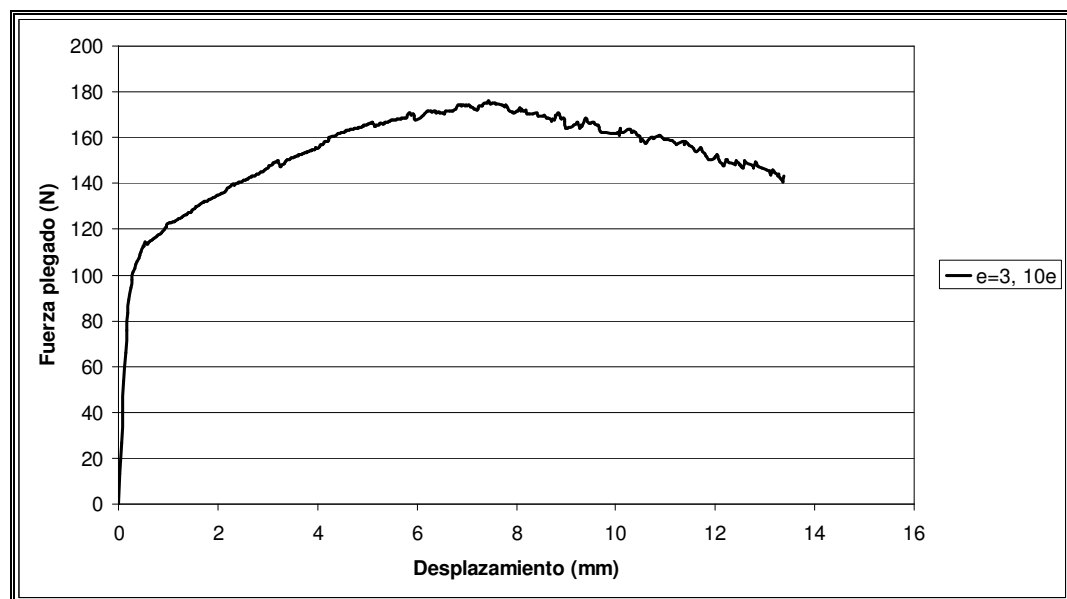
**Gráfica 27. Optimización fuerza plegado espesor 3, abertura 8·espesor**

- Abertura  $10 \cdot e = 30$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 182                            | 170            |

|   |      |
|---|------|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'15 |
|---|------|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 174 |
|---|-----|



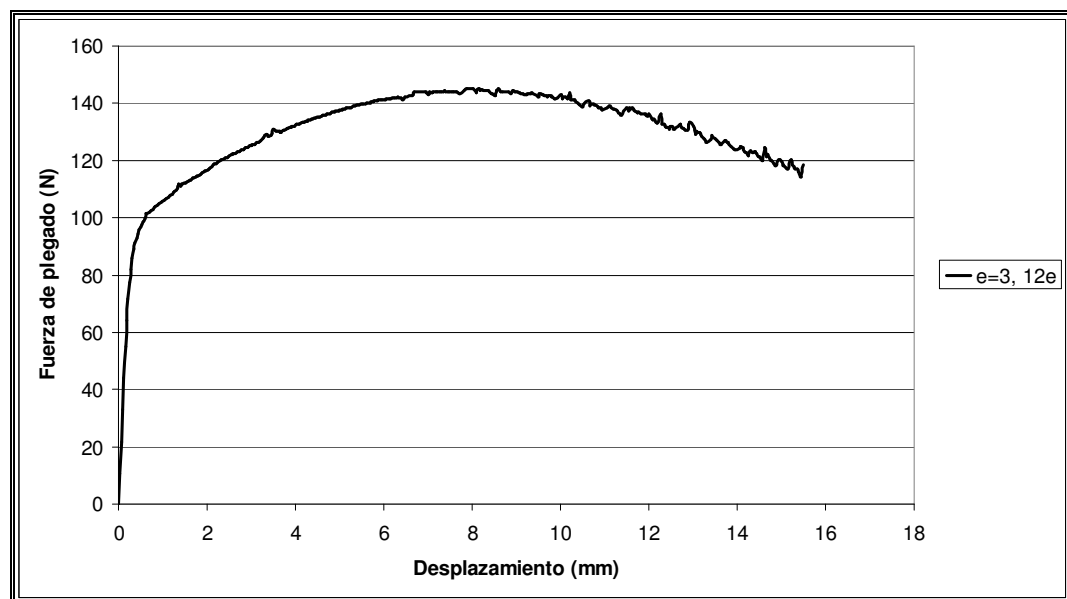
**Gráfica 28. Optimización fuerza plegado espesor 3, abertura 10-espesor**

- Abertura  $12 \cdot e = 36 \text{ mm}$

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 150                            | 142            |

|   |      |
|---|------|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'15 |
|---|------|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 144 |
|---|-----|



**Gráfica 29. Optimización fuerza plegado espesor 3, abertura 12-espesor**

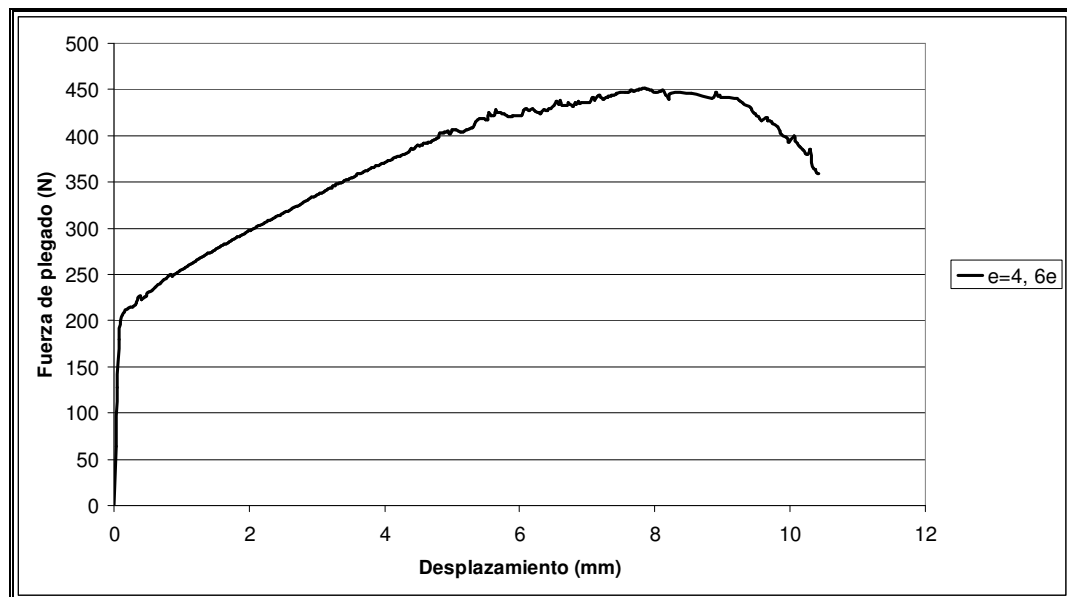
## ESPESOR 4 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 24$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 460                            | 450            |

|   |      |
|---|------|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'22 |
|---|------|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 450 |
|---|-----|



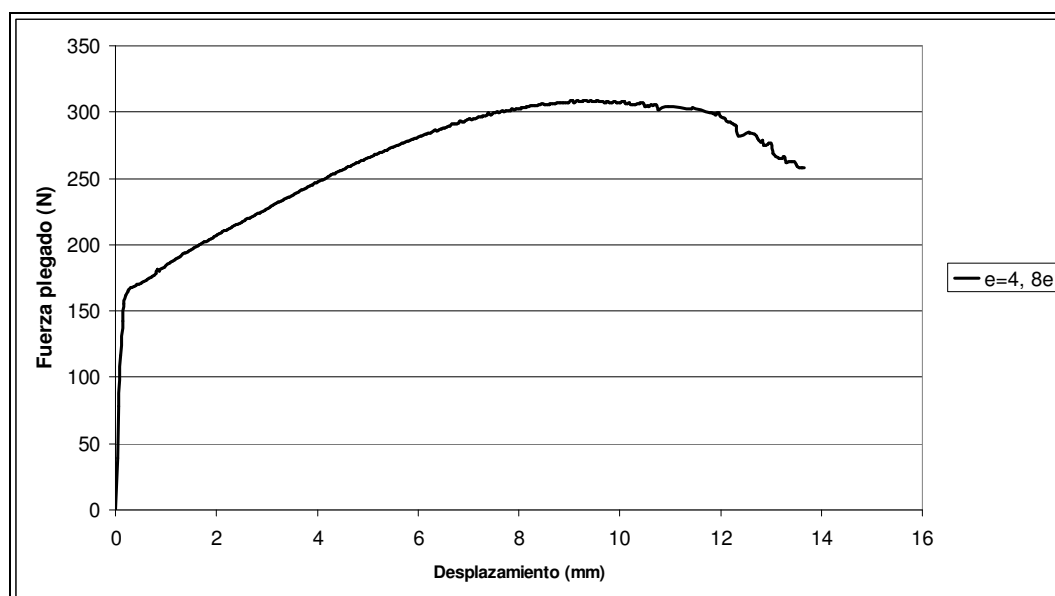
**Gráfica 30. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 6·espesor**

- Abertura  $8 \cdot e = 32$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 292                            | 305            |

|   |     |
|---|-----|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'4 |
|---|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 300 |
|---|-----|



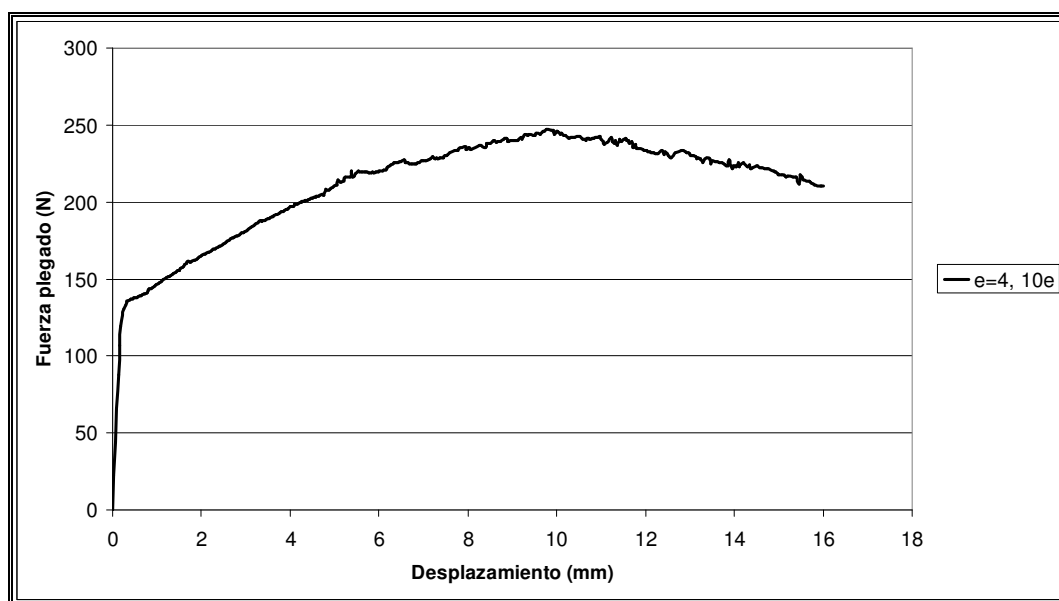
**Gráfica 31. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 8-espesor**

- Abertura  $10 \cdot e = 40$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 240                            | 253            |

|   |     |
|---|-----|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'4 |
|---|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 247 |
|---|-----|



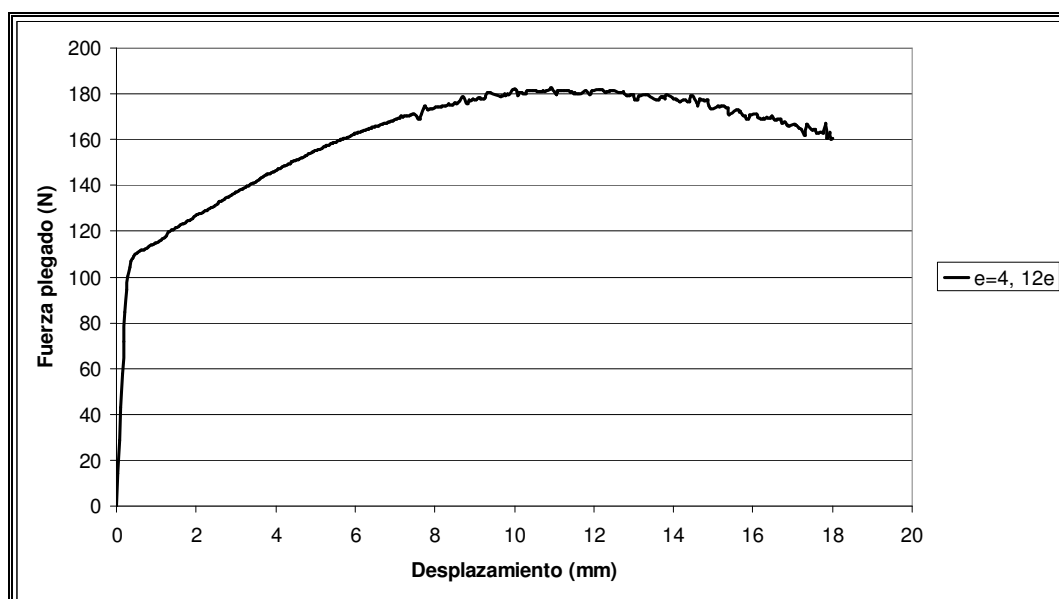
**Gráfica 32. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 10-espesor**

- Abertura  $12 \cdot e = 48$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 176                            | 183            |

|   |     |
|---|-----|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'4 |
|---|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 181 |
|---|-----|



**Gráfica 33. Optimización fuerza plegado espesor 4, abertura 12-espesor**

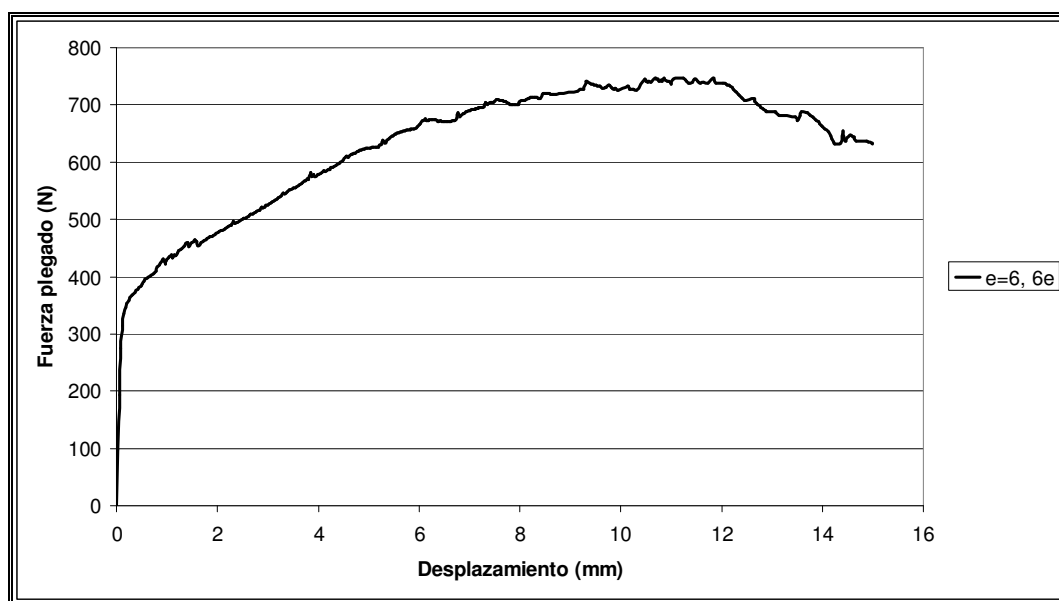
## ESPESOR 6 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 36$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 770                            | 744            |

|   |       |
|---|-------|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'186 |
|---|-------|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 745 |
|---|-----|



**Gráfica 34. Optimización fuerza plegado espesor 6, abertura  $6 \cdot \text{espesor}$**

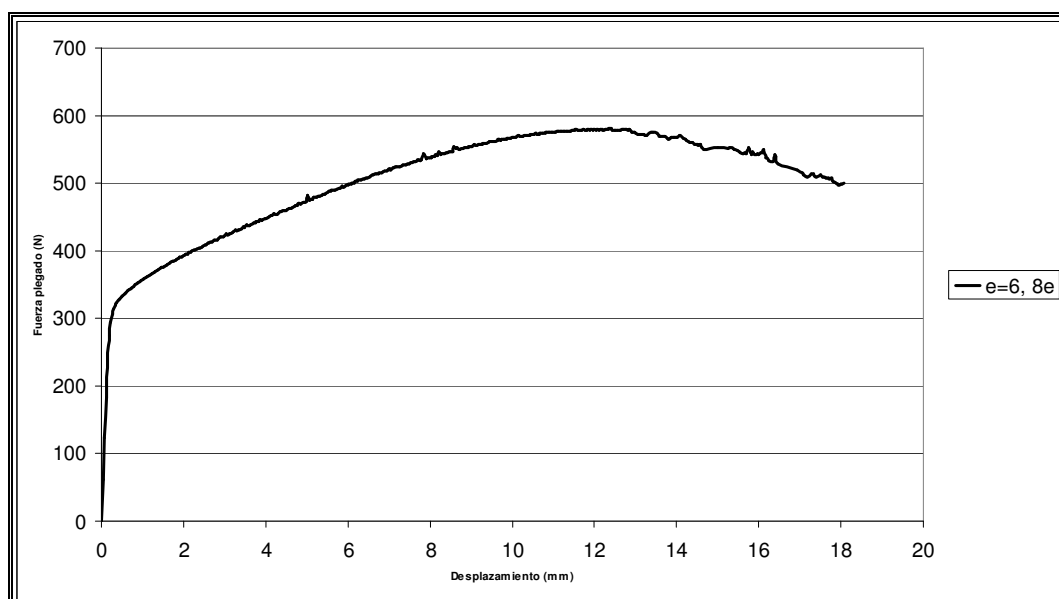


- Abertura  $8 \cdot e = 48$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 535                            | 571            |

|   |     |
|---|-----|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'4 |
|---|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 550 |
|---|-----|



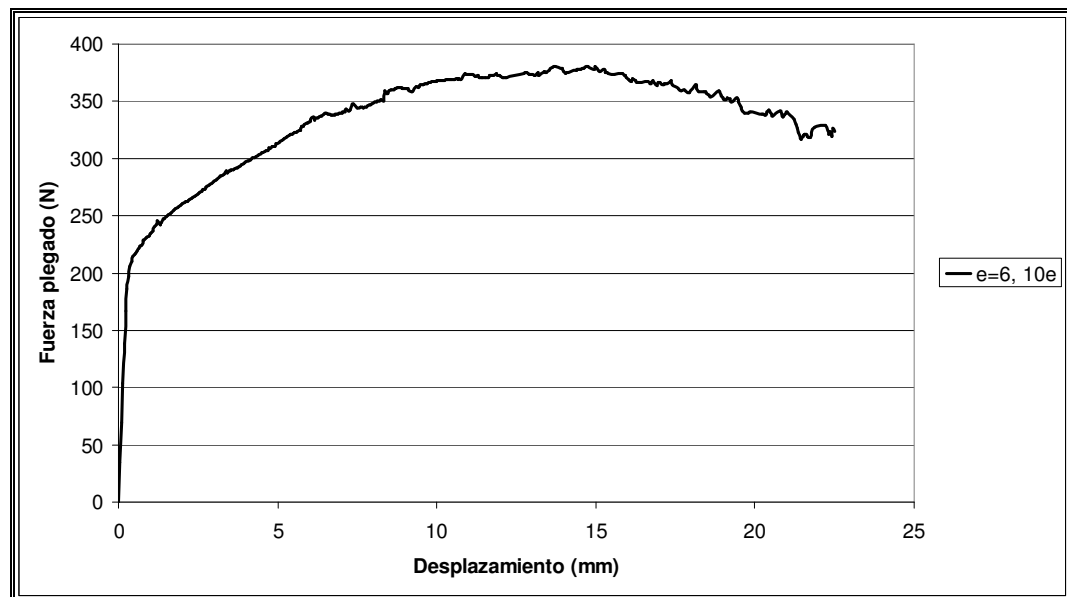
**Gráfica 35. Optimización fuerza plegado espesor 6, abertura 8·espesor**

- Abertura  $10 \cdot e = 60$  mm

|                       | Primera prueba en<br>DEFORM 2D | Ensayos reales |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fuerza plegado<br>[N] | 375                            | 378            |

|   |       |
|---|-------|
| Nuevo valor del<br>coeficiente de<br>rozamiento $\mu$ | 0'328 |
|---|-------|

|   |     |
|---|-----|
| Fuerza máxima de<br>plegado después del<br>ajuste [N] | 378 |
|---|-----|



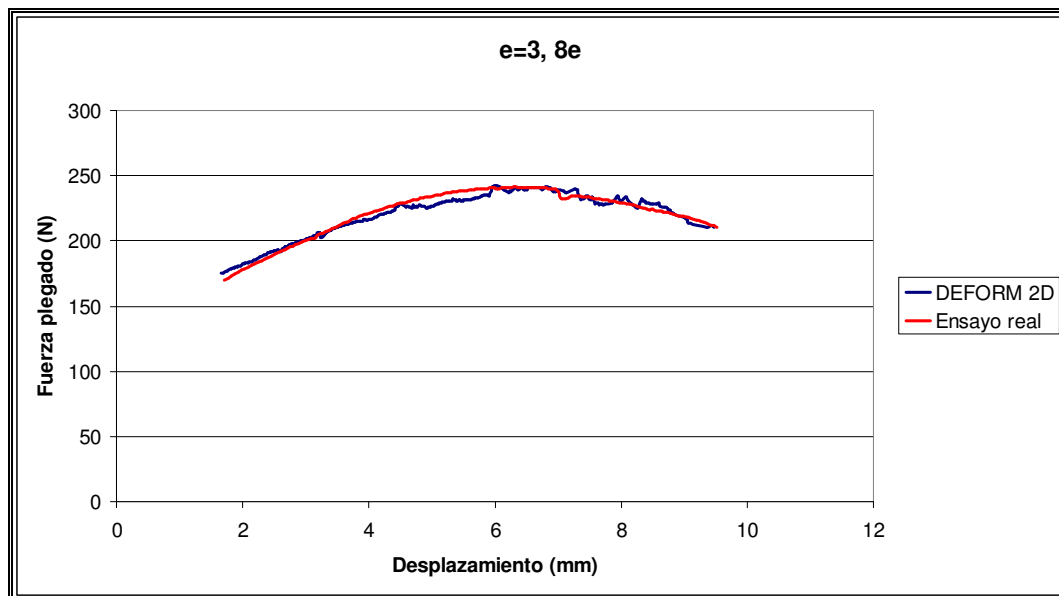
**Gráfica 36. Optimización fuerza plegado espesor 6, abertura 10-espesor**

### 4.3. Comparación de resultados

Ahora se compara los resultados obtenidos en las gráficas de ensayos de plegado reales con los obtenidos en el programa DEFORM 2D, después de optimizar el modelo.

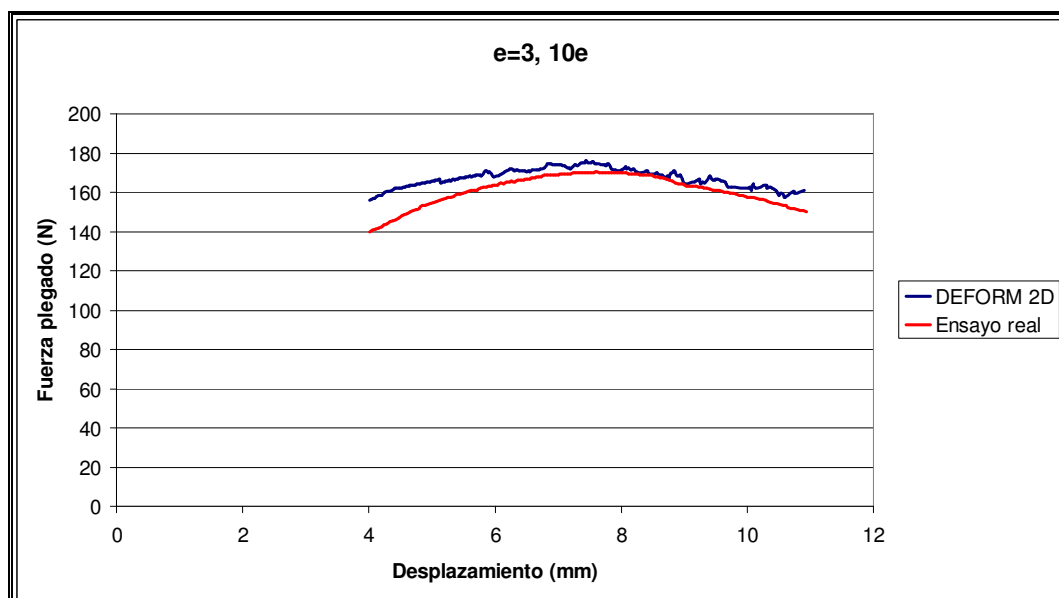
## ESPESOR 3 mm

- Abertura  $8 \cdot e = 24$  mm



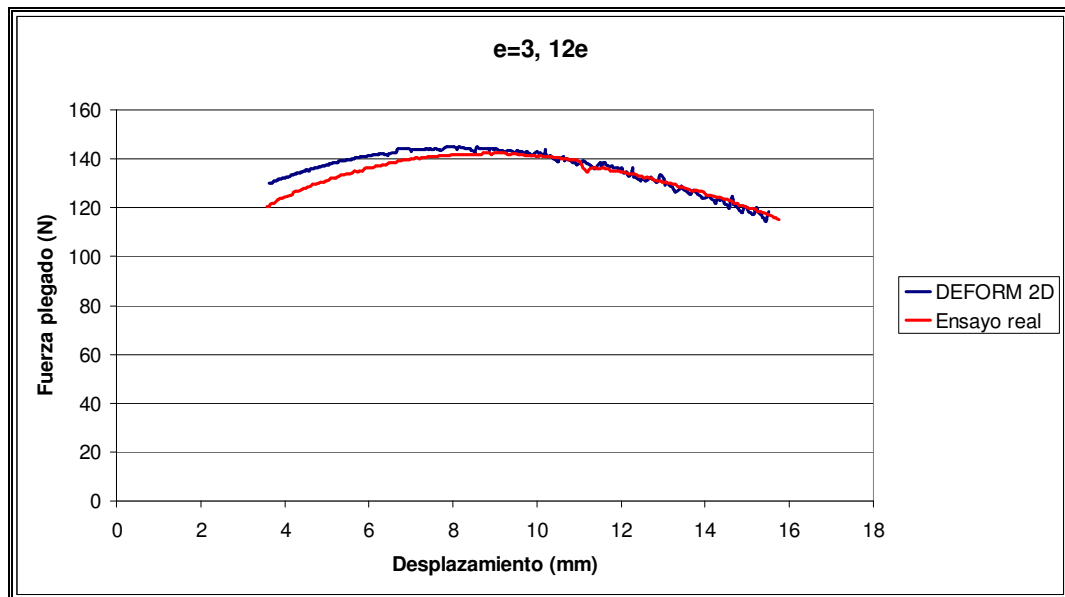
**Gráfica 37. Zoom comparación fuerza plegado espesor 3, abertura 8·e**

- Abertura  $10 \cdot e = 30$  mm



**Gráfica 38. Zoom comparación fuerza plegado espesor 3, abertura 10·e**

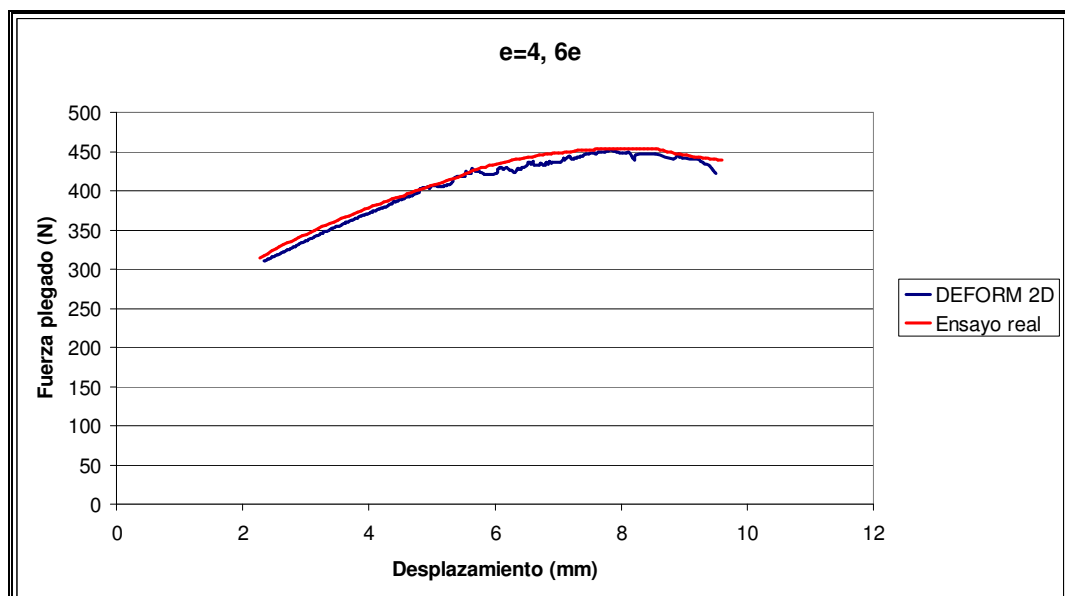
- Abertura  $12 \cdot e = 36 \text{ mm}$



**Gráfica 39. Zoom comparación fuerza plegado espesor 3, abertura 10·e**

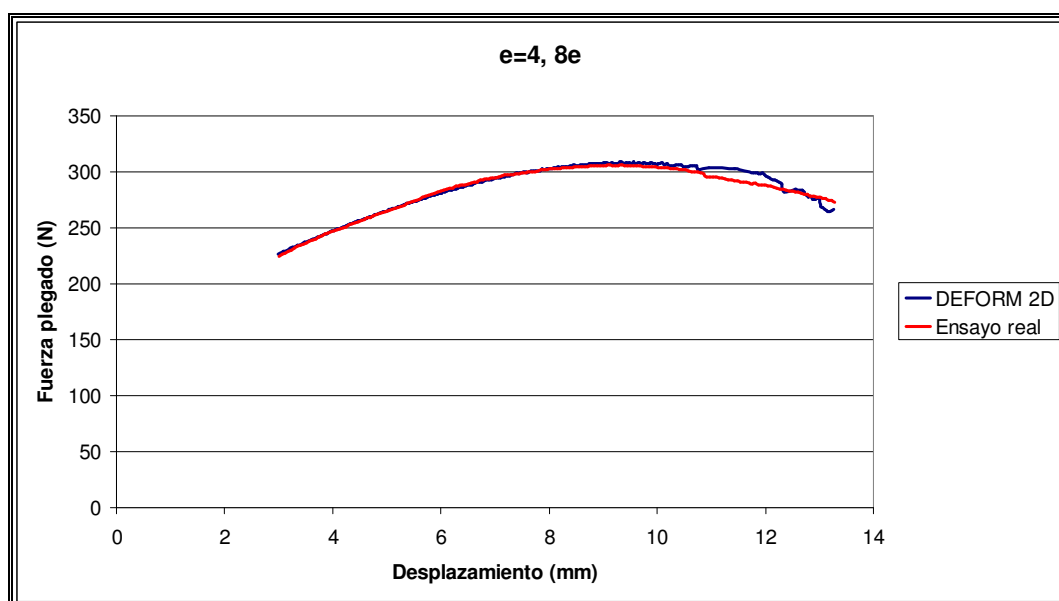
#### ESPESOR 4 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 24 \text{ mm}$



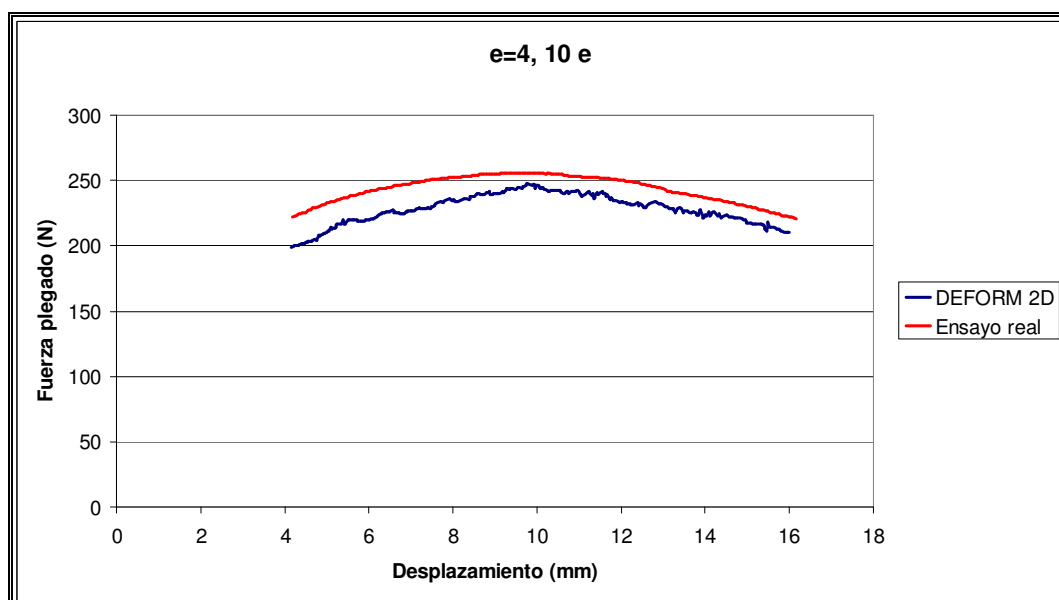
**Gráfica 40. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 6·e**

- Abertura  $8 \cdot e = 32$  mm



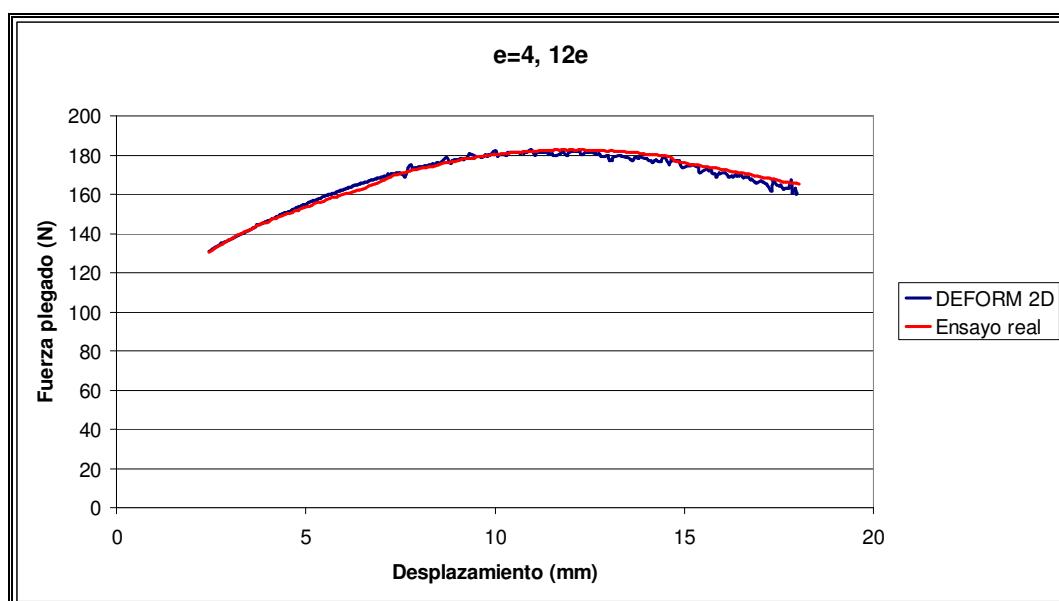
**Gráfica 41. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 8·e**

- Abertura  $10 \cdot e = 40$  mm



**Gráfica 42. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 10·e**

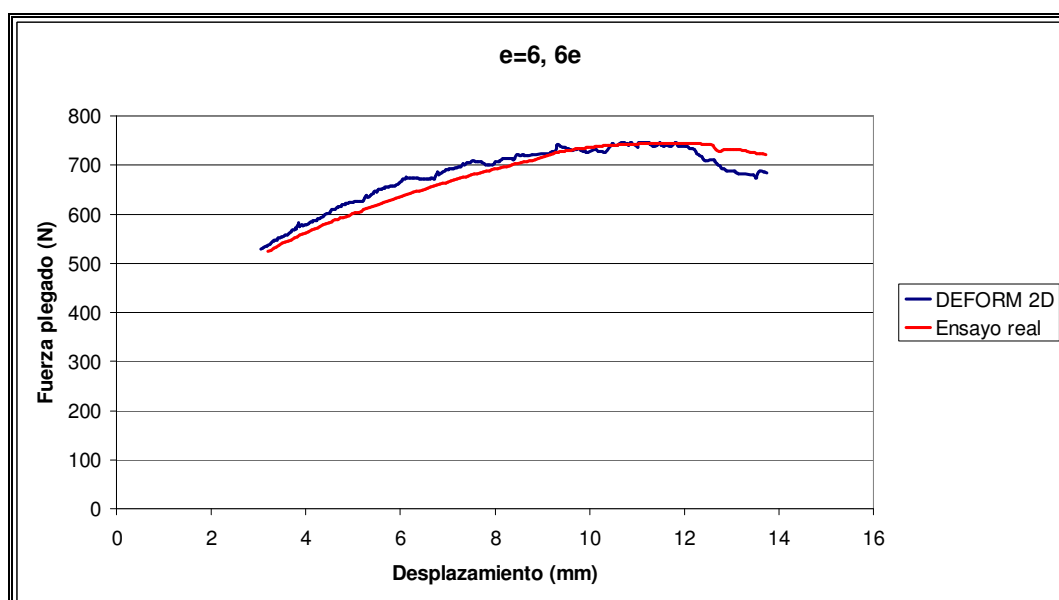
- Abertura  $12 \cdot e = 48 \text{ mm}$



**Gráfica 43. Zoom comparación fuerza plegado espesor 4, abertura 12·e**

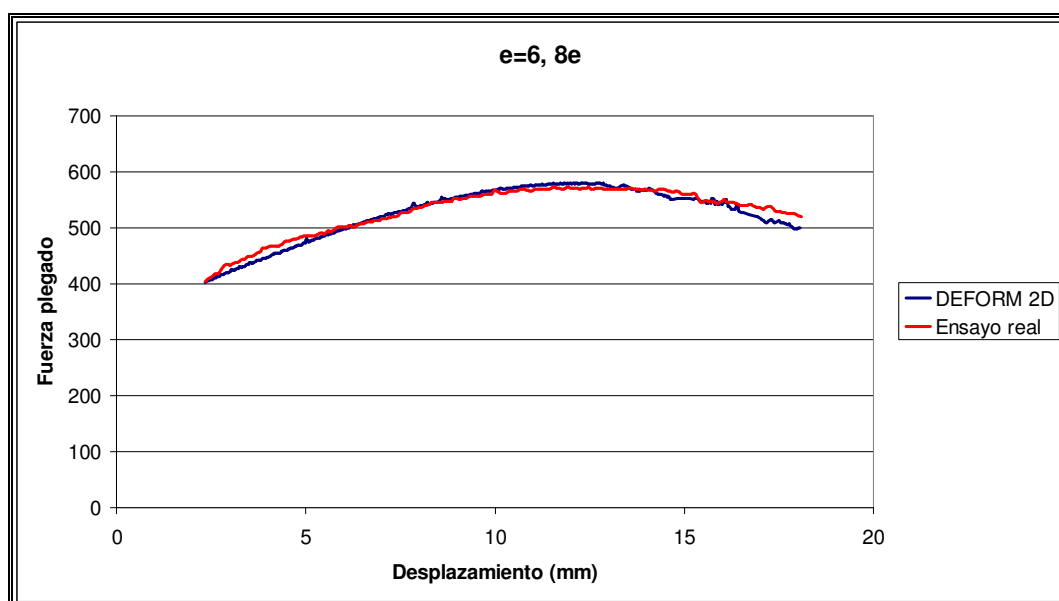
## ESPESOR 6 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 36 \text{ mm}$



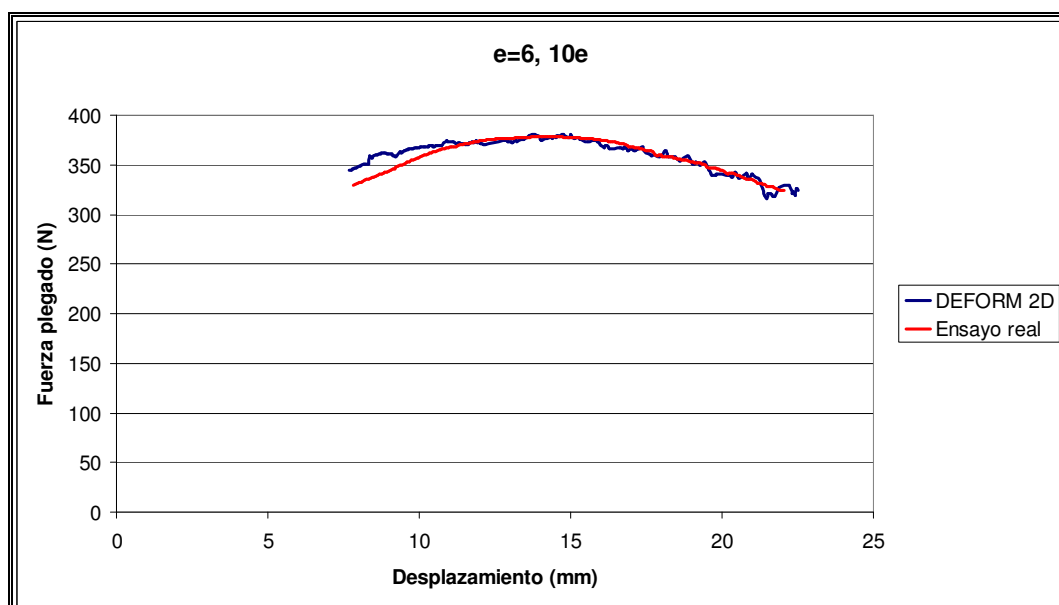
**Gráfica 44. Zoom comparación fuerza plegado espesor 6, abertura 6·e**

- Abertura  $8 \cdot e = 48$  mm



**Gráfica 45. Zoom comparación fuerza plegado espesor 6, abertura 8·e**

- Abertura  $10 \cdot e = 60$  mm



**Gráfica 46. Zoom comparación fuerza plegado espesor 6, abertura 10·e**

#### 4.4. Error final del modelo

Al comparar los valores de fuerza máxima de plegado a través del programa informático DEFORM 2D con los valores obtenidos en ensayos de plegado reales, se observa que se producen diferencias. Algunas veces son casi inapreciables, pero hay casos en los que esa diferencia es más sensible.

A continuación se analiza para cada uno de los casos el error que se produce en el valor de la fuerza máxima de plegado.

##### ESPESOR 3 mm

- Abertura  $8 \cdot e = 24$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error % |
|---------------------|-----------------------|---------|
| 240                 | 240                   | 0       |

- Abertura  $10 \cdot e = 30$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error % |
|---------------------|-----------------------|---------|
| 174                 | 170                   | 2'299   |

- Abertura  $12 \cdot e = 36$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error % |
|---------------------|-----------------------|---------|
| 144                 | 142                   | 1'389   |

##### ESPESOR 4 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 24$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error % |
|---------------------|-----------------------|---------|
| 450                 | 450                   | 0       |

- Abertura  $8 \cdot e = 32$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error % |
|---------------------|-----------------------|---------|
| 300                 | 305                   | 1'667   |



- Abertura  $10 \cdot e = 40$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error %      |
|---------------------|-----------------------|--------------|
| <b>247</b>          | <b>253</b>            | <b>2'429</b> |

- Abertura  $12 \cdot e = 48$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error %      |
|---------------------|-----------------------|--------------|
| <b>181</b>          | <b>183</b>            | <b>1'105</b> |

#### ESPESOR 6 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 36$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error %      |
|---------------------|-----------------------|--------------|
| <b>745</b>          | <b>744</b>            | <b>0'134</b> |

- Abertura  $8 \cdot e = 48$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error %      |
|---------------------|-----------------------|--------------|
| <b>550</b>          | <b>571</b>            | <b>3'818</b> |

- Abertura  $10 \cdot e = 60$  mm

| F. DEFORM 2D<br>[N] | F. Ensayo real<br>[N] | Error %  |
|---------------------|-----------------------|----------|
| <b>378</b>          | <b>378</b>            | <b>0</b> |

#### 4.5. Validación del modelo

Se trata de encontrar un valor del coeficiente de rozamiento tal que el error entre los plegados en DEFORM 2D y los ensayos reales sea mínimo.

Se han tomado distintos valores del coeficiente de rozamiento para ver la fuerza máxima de plegado en cada uno de los casos y el error que cometo al compararlo con los ensayos reales.

En los siguientes cuadros se muestra un resumen de los valores que se han obtenido al variar el coeficiente de rozamiento.

| Espesor | Abertura | $\mu$       | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|-------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'32</b> | 237        | 240              | 1'265   | <b>4'820</b> |
|         | 10·e     | <b>0'32</b> | 191        | 170              | 10'902  |              |
|         | 12·e     | <b>0'32</b> | 158        | 142              | 10'072  |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'32</b> | 467        | 450              | 3'728   |              |
|         | 8·e      | <b>0'32</b> | 295        | 305              | 3'429   |              |
|         | 10·e     | <b>0'32</b> | 242        | 253              | 4'205   |              |
|         | 12·e     | <b>0'32</b> | 178        | 183              | 2'858   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'32</b> | 791        | 744              | 5'910   |              |
|         | 8·e      | <b>0'32</b> | 541        | 571              | 5'618   |              |
|         | 10·e     | <b>0'32</b> | 377        | 378              | 0'208   |              |

**Tabla 7. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'32$**

| Espesor | Abertura | $\mu$       | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|-------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'29</b> | 235        | 240              | 1,969   | <b>4'726</b> |
|         | 10·e     | <b>0'29</b> | 188        | 170              | 9,496   |              |
|         | 12·e     | <b>0'29</b> | 155        | 142              | 8,653   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'29</b> | 462        | 450              | 2,639   |              |
|         | 8·e      | <b>0'29</b> | 293        | 305              | 4,106   |              |
|         | 10·e     | <b>0'29</b> | 241        | 253              | 4,887   |              |
|         | 12·e     | <b>0'29</b> | 177        | 183              | 3,531   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'29</b> | 780        | 744              | 4,675   |              |
|         | 8·e      | <b>0'29</b> | 537        | 571              | 6,309   |              |
|         | 10·e     | <b>0'29</b> | 374        | 378              | 0,997   |              |

**Tabla 8. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'29$**

| Espesor | Abertura | $\mu$       | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|-------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'28</b> | 235        | 240              | 2,206   | <b>4'693</b> |
|         | 10·e     | <b>0'28</b> | 187        | 170              | 9,017   |              |
|         | 12·e     | <b>0'28</b> | 155        | 142              | 8,170   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'28</b> | 460        | 450              | 2,271   |              |
|         | 8·e      | <b>0'28</b> | 292        | 305              | 4,333   |              |
|         | 10·e     | <b>0'28</b> | 241        | 253              | 5,116   |              |
|         | 12·e     | <b>0'28</b> | 176        | 183              | 3,757   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'28</b> | 777        | 744              | 4,257   |              |
|         | 8·e      | <b>0'28</b> | 536        | 571              | 6,541   |              |
|         | 10·e     | <b>0'28</b> | 373        | 378              | 1,263   |              |

**Tabla 9. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'28$**

| Espesor | Abertura | $\mu$       | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|-------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'27</b> | 234        | 240              | 2,444   | <b>4'659</b> |
|         | 10·e     | <b>0'27</b> | 186        | 170              | 8,533   |              |
|         | 12·e     | <b>0'27</b> | 154        | 142              | 7,681   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'27</b> | 459        | 450              | 1,900   |              |
|         | 8·e      | <b>0'27</b> | 292        | 305              | 4,562   |              |
|         | 10·e     | <b>0'27</b> | 240        | 253              | 5,346   |              |
|         | 12·e     | <b>0'27</b> | 176        | 183              | 3,984   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'27</b> | 774        | 744              | 3,834   |              |
|         | 8·e      | <b>0'27</b> | 535        | 571              | 6,775   |              |
|         | 10·e     | <b>0'27</b> | 372        | 378              | 1,530   |              |

**Tabla 10. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'27$**

| Espesor | Abertura | $\mu$       | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|-------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'26</b> | 234        | 240              | 2,683   | <b>4'624</b> |
|         | 10·e     | <b>0'26</b> | 185        | 170              | 8,044   |              |
|         | 12·e     | <b>0'26</b> | 153        | 142              | 7,188   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'26</b> | 457        | 450              | 1,525   |              |
|         | 8·e      | <b>0'26</b> | 291        | 305              | 4,792   |              |
|         | 10·e     | <b>0'26</b> | 240        | 253              | 5,577   |              |
|         | 12·e     | <b>0'26</b> | 176        | 183              | 4,213   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'26</b> | 770        | 744              | 3,408   |              |
|         | 8·e      | <b>0'26</b> | 534        | 571              | 7,009   |              |
|         | 10·e     | <b>0'26</b> | 371        | 378              | 1,798   |              |

**Tabla 11. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'26$**

| Espesor | Abertura | $\mu$       | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|-------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'25</b> | 233        | 240              | 2,923   | <b>4'588</b> |
|         | 10·e     | <b>0'25</b> | 184        | 170              | 7,550   |              |
|         | 12·e     | <b>0'25</b> | 152        | 142              | 6,689   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'25</b> | 455        | 450              | 1,148   |              |
|         | 8·e      | <b>0'25</b> | 290        | 305              | 5,022   |              |
|         | 10·e     | <b>0'25</b> | 239        | 253              | 5,810   |              |
|         | 12·e     | <b>0'25</b> | 175        | 183              | 4,442   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'25</b> | 767        | 744              | 2,979   |              |
|         | 8·e      | <b>0'25</b> | 532        | 571              | 7,245   |              |
|         | 10·e     | <b>0'25</b> | 370        | 378              | 2,068   |              |

**Tabla 12. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'25$**

| Espesor | Abertura | $\mu$       | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|-------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'24</b> | 233        | 240              | 3,164   | <b>4'550</b> |
|         | 10·e     | <b>0'24</b> | 183        | 170              | 7,050   |              |
|         | 12·e     | <b>0'24</b> | 151        | 142              | 6,185   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'24</b> | 453        | 450              | 0,769   |              |
|         | 8·e      | <b>0'24</b> | 290        | 305              | 5,254   |              |
|         | 10·e     | <b>0'24</b> | 239        | 253              | 6,043   |              |
|         | 12·e     | <b>0'24</b> | 175        | 183              | 4,672   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'24</b> | 763        | 744              | 2,545   |              |
|         | 8·e      | <b>0'24</b> | 531        | 571              | 7,481   |              |
|         | 10·e     | <b>0'24</b> | 369        | 378              | 2,339   |              |

**Tabla 13. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'24$**

| Espesor | Abertura | $\mu$        | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|--------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'243</b> | 233        | 240              | 3,092   | <b>4'562</b> |
|         | 10·e     | <b>0'243</b> | 183        | 170              | 7,201   |              |
|         | 12·e     | <b>0'243</b> | 152        | 142              | 6,337   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'243</b> | 454        | 450              | 0,883   |              |
|         | 8·e      | <b>0'243</b> | 290        | 305              | 5,184   |              |
|         | 10·e     | <b>0'243</b> | 239        | 253              | 5,973   |              |
|         | 12·e     | <b>0'243</b> | 175        | 183              | 4,603   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'243</b> | 764        | 744              | 2,675   |              |
|         | 8·e      | <b>0'243</b> | 532        | 571              | 7,410   |              |
|         | 10·e     | <b>0'243</b> | 370        | 378              | 2,258   |              |

**Tabla 14. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'243$**

| Espesor | Abertura | $\mu$        | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|--------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'244</b> | 233        | 240              | 3,068   | <b>4'565</b> |
|         | 10·e     | <b>0'244</b> | 183        | 170              | 7,251   |              |
|         | 12·e     | <b>0'244</b> | 152        | 142              | 6,387   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'244</b> | 454        | 450              | 0,921   |              |
|         | 8·e      | <b>0'244</b> | 290        | 305              | 5,161   |              |
|         | 10·e     | <b>0'244</b> | 239        | 253              | 5,950   |              |
|         | 12·e     | <b>0'244</b> | 175        | 183              | 4,580   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'244</b> | 765        | 744              | 2,719   |              |
|         | 8·e      | <b>0'244</b> | 532        | 571              | 7,386   |              |
|         | 10·e     | <b>0'244</b> | 370        | 378              | 2,231   |              |

**Tabla 15. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'244$**

| Espesor | Abertura | $\mu$        | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|--------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'245</b> | 233        | 240              | 3,043   | <b>4'569</b> |
|         | 10·e     | <b>0'245</b> | 183        | 170              | 7,301   |              |
|         | 12·e     | <b>0'245</b> | 152        | 142              | 6,438   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'245</b> | 454        | 450              | 0,959   |              |
|         | 8·e      | <b>0'245</b> | 290        | 305              | 5,138   |              |
|         | 10·e     | <b>0'245</b> | 239        | 253              | 5,926   |              |
|         | 12·e     | <b>0'245</b> | 175        | 183              | 4,557   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'245</b> | 765        | 744              | 2,762   |              |
|         | 8·e      | <b>0'245</b> | 532        | 571              | 7,363   |              |
|         | 10·e     | <b>0'245</b> | 370        | 378              | 2,203   |              |

**Tabla 16. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'245$**

| Espesor | Abertura | $\mu$        | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio  |
|---------|----------|--------------|------------|------------------|---------|--------------|
| 3 mm    | 8·e      | <b>0'246</b> | 233        | 240              | 3'004   | <b>4'478</b> |
|         | 10·e     | <b>0'246</b> | 183        | 170              | 7'104   |              |
|         | 12·e     | <b>0'246</b> | 151        | 142              | 5'960   |              |
| 4 mm    | 6·e      | <b>0'246</b> | 454        | 450              | 0'881   |              |
|         | 8·e      | <b>0'246</b> | 290        | 305              | 5'172   |              |
|         | 10·e     | <b>0'246</b> | 239        | 253              | 5'858   |              |
|         | 12·e     | <b>0'246</b> | 175        | 183              | 4'571   |              |
| 6 mm    | 6·e      | <b>0'246</b> | 765        | 744              | 2'745   |              |
|         | 8·e      | <b>0'246</b> | 532        | 571              | 7'331   |              |
|         | 10·e     | <b>0'246</b> | 370        | 378              | 2'162   |              |

**Tabla 17. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'246$**

| Espesor | Abertura | $\mu$ | F obtenida | F ensayos reales | Error % | Error medio |
|---------|----------|-------|------------|------------------|---------|-------------|
| 3 mm    | 8·e      | 0'247 | 233        | 240              | 2,995   | 4'576       |
|         | 10·e     | 0'247 | 184        | 170              | 7,401   |             |
|         | 12·e     | 0'247 | 152        | 142              | 6,538   |             |
| 4 mm    | 6·e      | 0'247 | 455        | 450              | 1,035   |             |
|         | 8·e      | 0'247 | 290        | 305              | 5,091   |             |
|         | 10·e     | 0'247 | 239        | 253              | 5,880   |             |
|         | 12·e     | 0'247 | 175        | 183              | 4,511   |             |
| 6 mm    | 6·e      | 0'247 | 766        | 744              | 2,849   |             |
|         | 8·e      | 0'247 | 532        | 571              | 7,315   |             |
|         | 10·e     | 0'247 | 370        | 378              | 2,149   |             |

**Tabla 18. Fuerza máxima plegado y error obtenidos para  $\mu=0'247$**

Viendo los valores obtenidos, se observa que el error medio menor es utilizando un coeficiente de rozamiento de 0'246, siendo además el caso en el que el error máximo puntual es el menor de los casos estudiados.

Por lo tanto será el coeficiente de rozamiento de 0'246 el utilizado en la optimización del modelo.

Conviene comentar que es igualmente válido e incluso más exacto, optimizar el coeficiente de rozamiento para cada espesor, puesto que los materiales de cada espesor son de lotes distintos. Incluso el de espesor 3 mm es laminado en frío y el de espesor 4 mm y 6 mm en caliente, con lo que el acabado es algo peor y teóricamente deben tener un coeficiente de rozamiento algo mayor. En todo caso la diferencia siempre es pequeña.

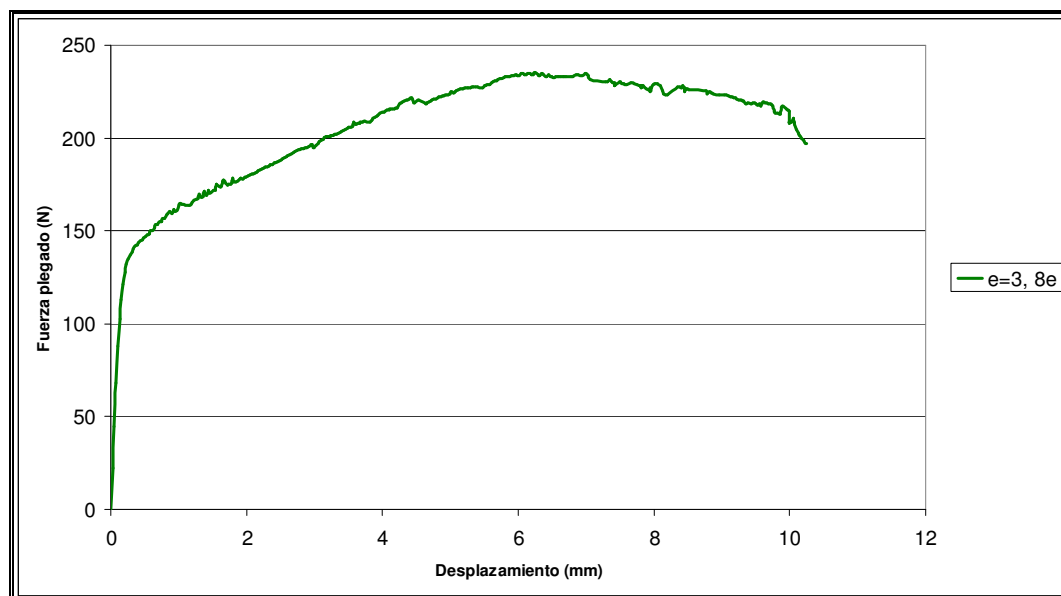
## 4.6. Resultados optimizados del modelo

### 4.6.1. Fuerza

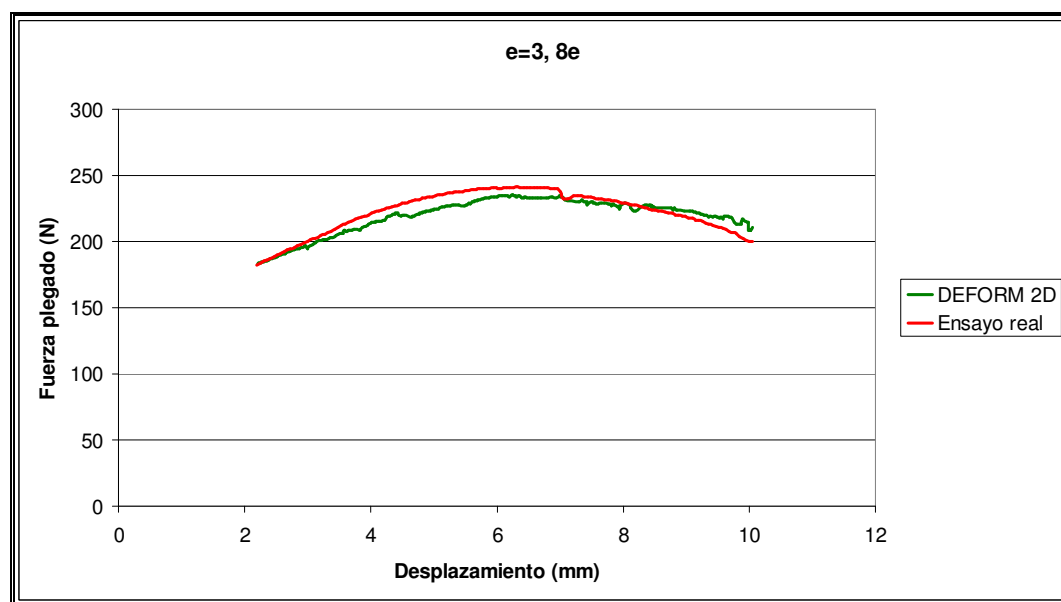
Una vez decidido el valor final del coeficiente de rozamiento, se muestran las gráficas de fuerza frente a desplazamiento para todos los espesores y aberturas de chapa con  $\mu=0'246$  y se comparan con las gráficas de ensayos reales para ver la diferencia entre las fuerzas máximas de plegado.

## ESPESOR 3 mm

- Abertura  $8 \cdot e = 24$  mm

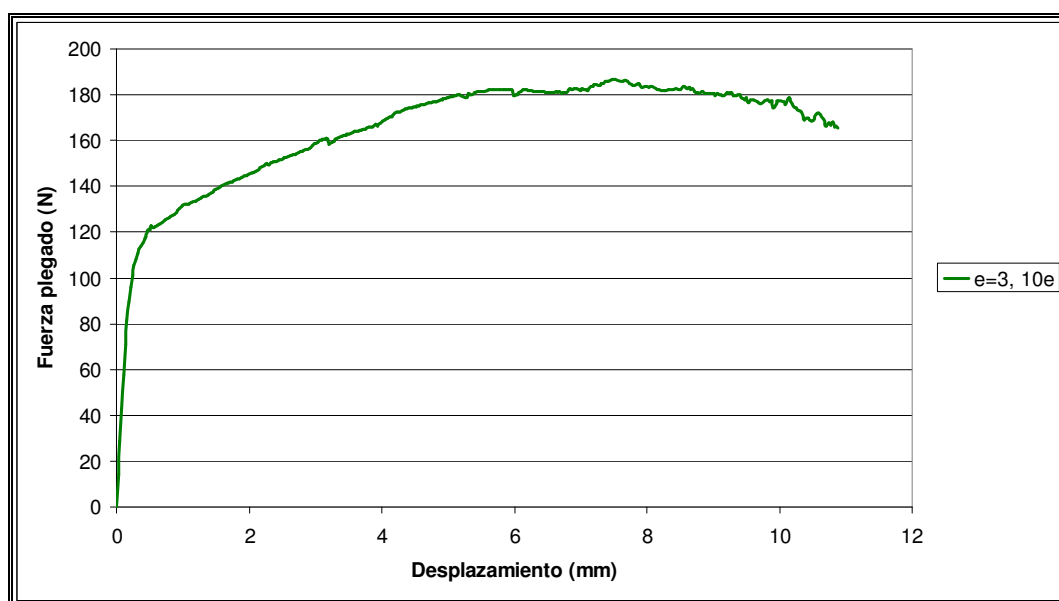


**Gráfica 47. Resultado final fuerza plegado espesor 3, apertura 8-espesor**

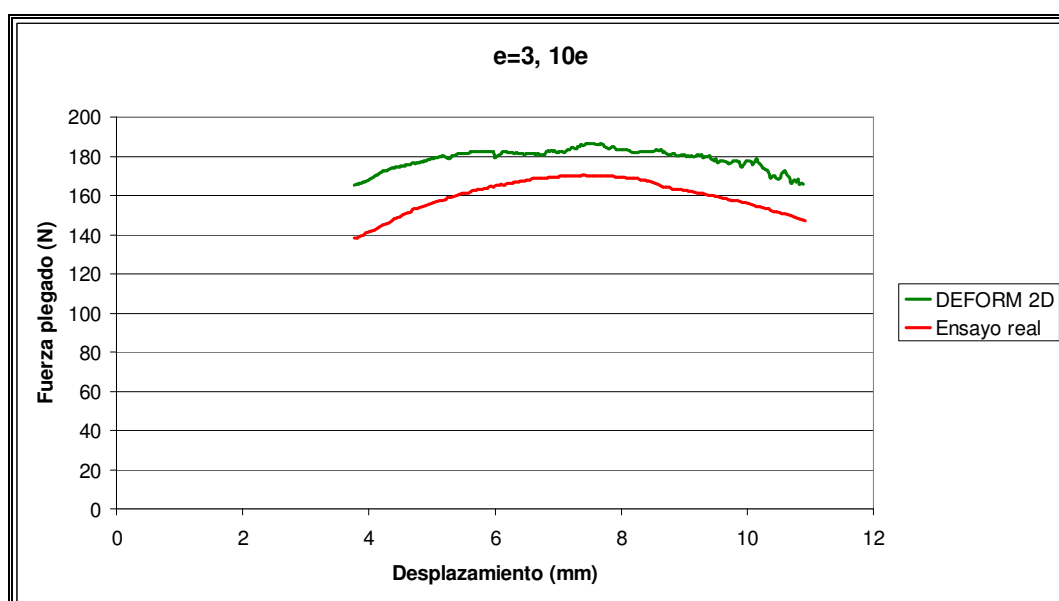


**Gráfica 48. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 3, apertura 8-espesor**

- Abertura  $10 \cdot e = 30 \text{ mm}$



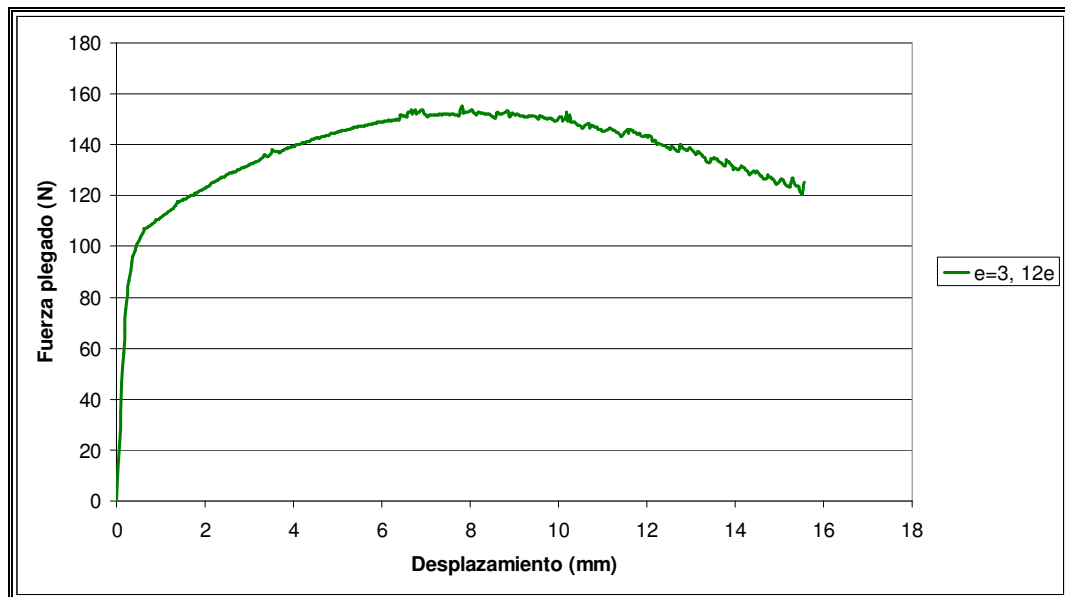
**Gráfica 49. Resultado final fuerza plegado espesor 3, abertura 10-espesor**



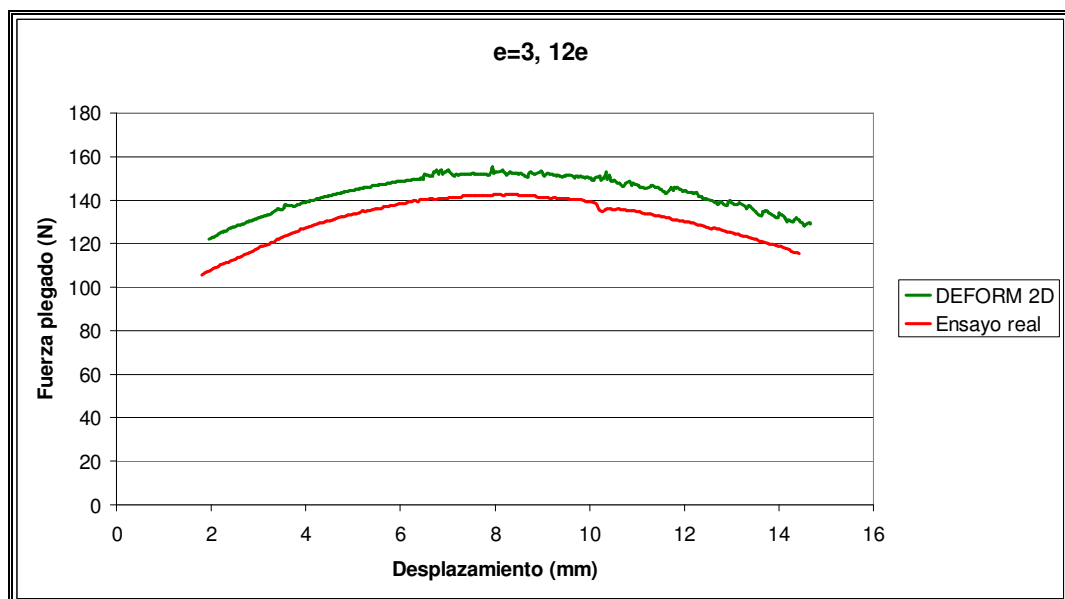
**Gráfica 50. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 3, abertura 10-espesor**



- Abertura  $12 \cdot e = 36 \text{ mm}$



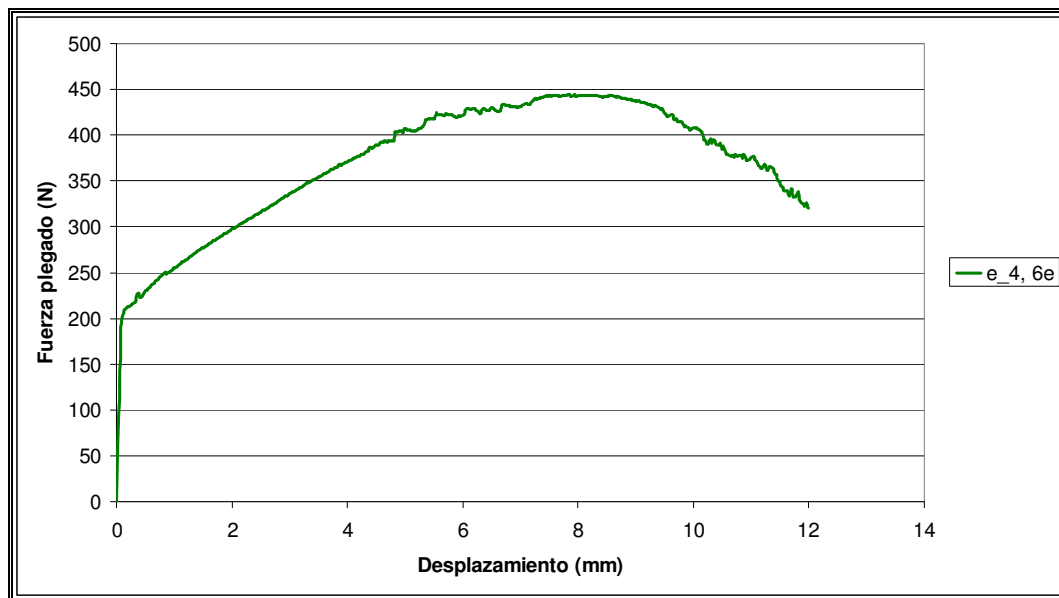
**Gráfica 51. Resultado final fuerza plegado espesor 3, abertura 12·espesor**



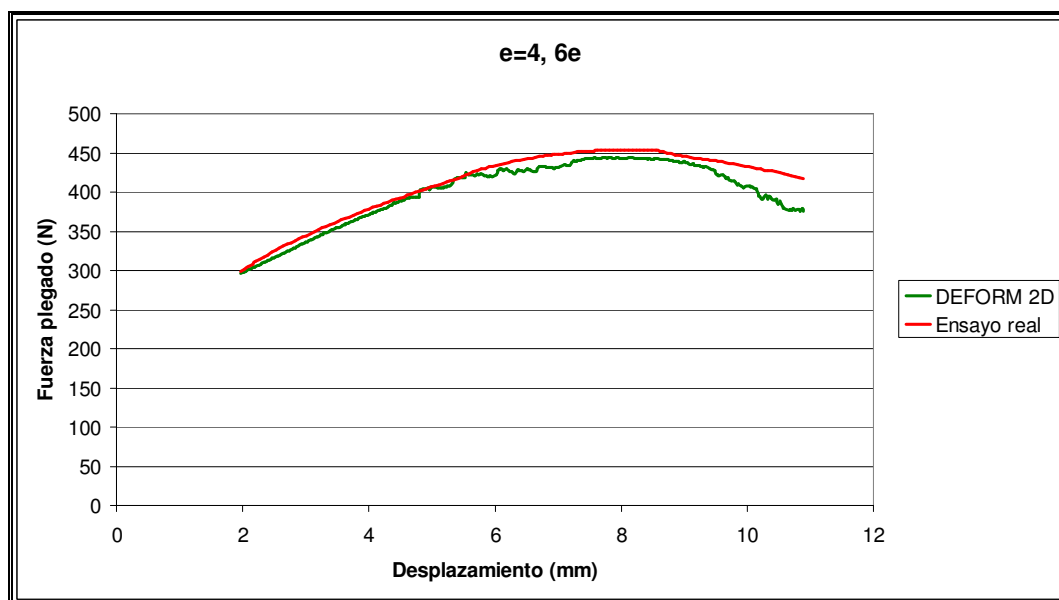
**Gráfica 52. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 3, abertura 12·espesor**

## ESPESOR 4 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 24$  mm

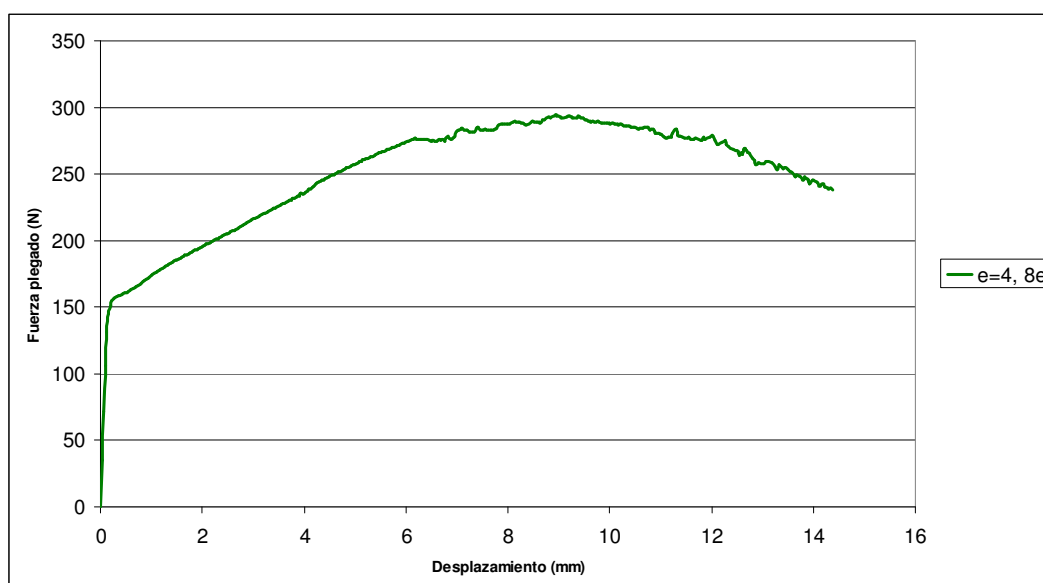


**Gráfica 53. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 6-espesor**

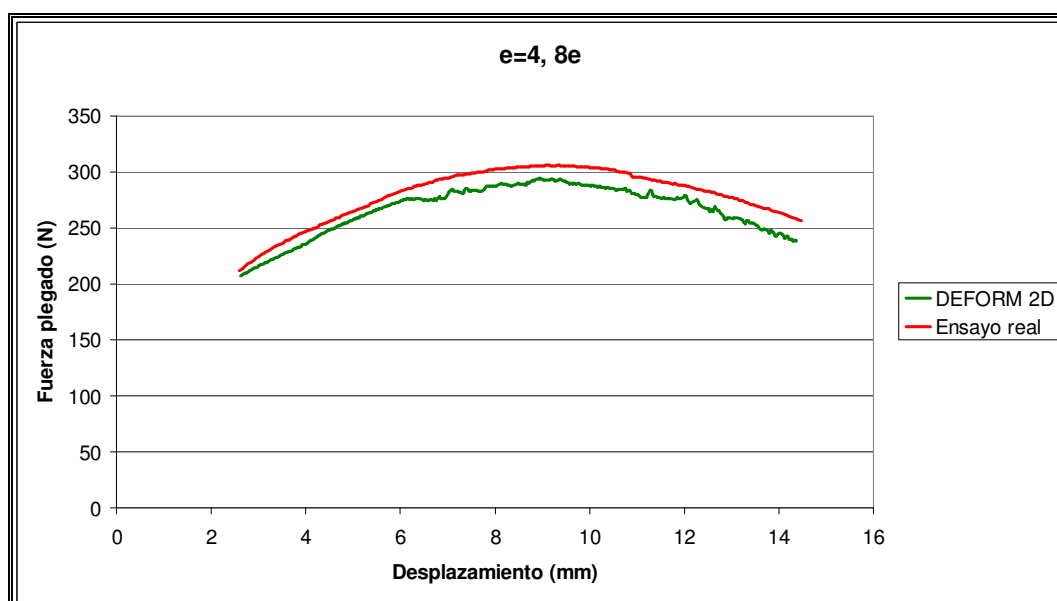


**Gráfica 54. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 6-espesor**

- Abertura  $8 \cdot e = 32$  mm

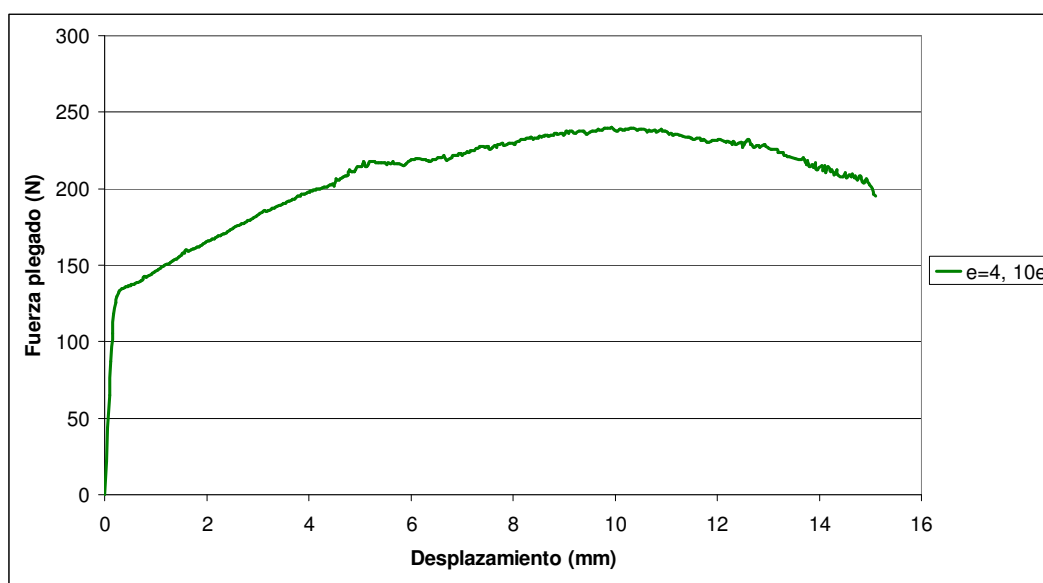


**Gráfica 55. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 8-espesor**

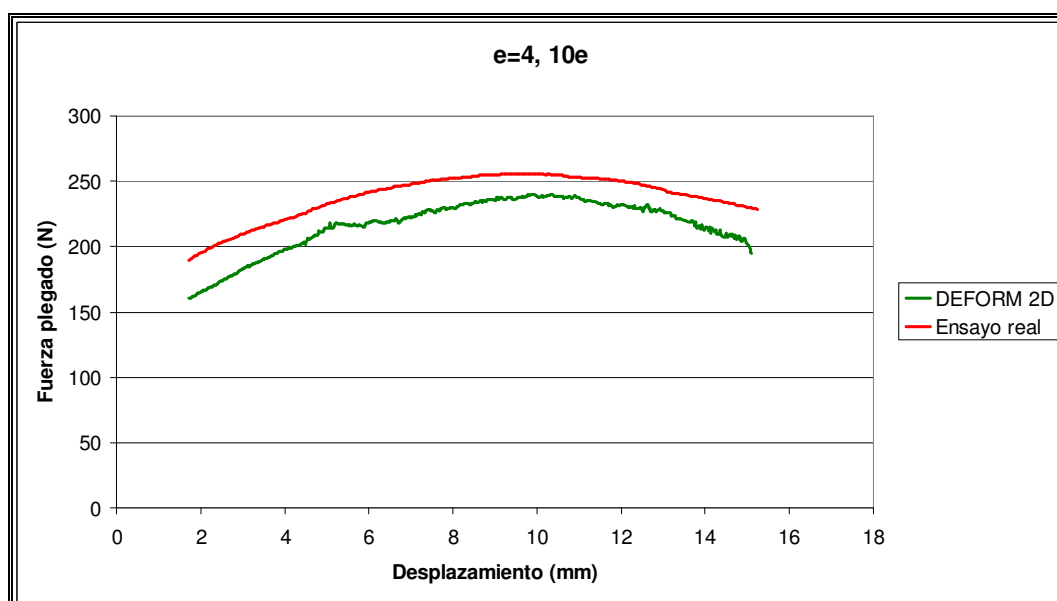


**Gráfica 56. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 8-espesor**

- Abertura  $10 \cdot e = 40 \text{ mm}$

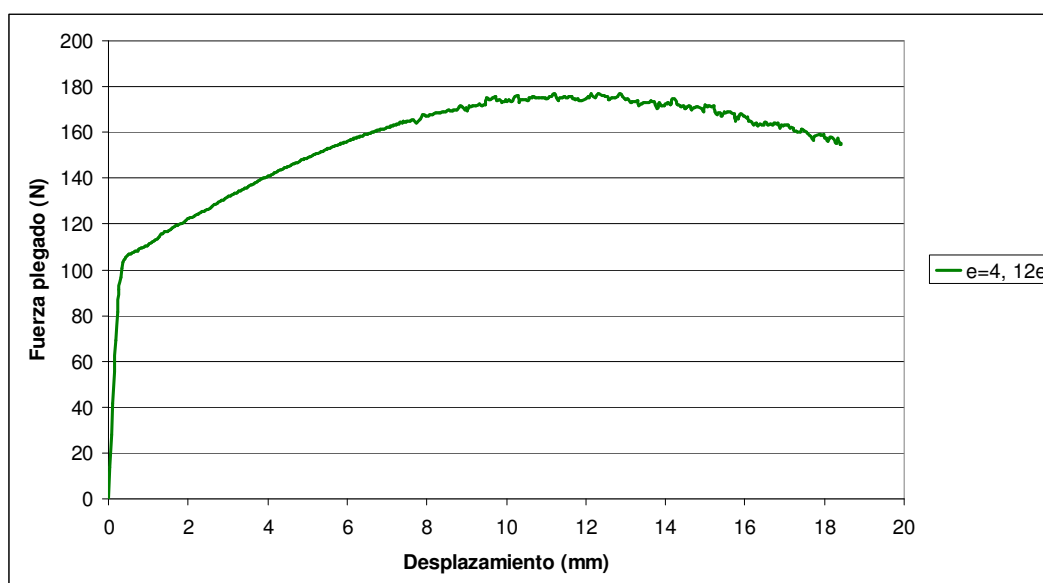


**Gráfica 57. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 10-espesor**

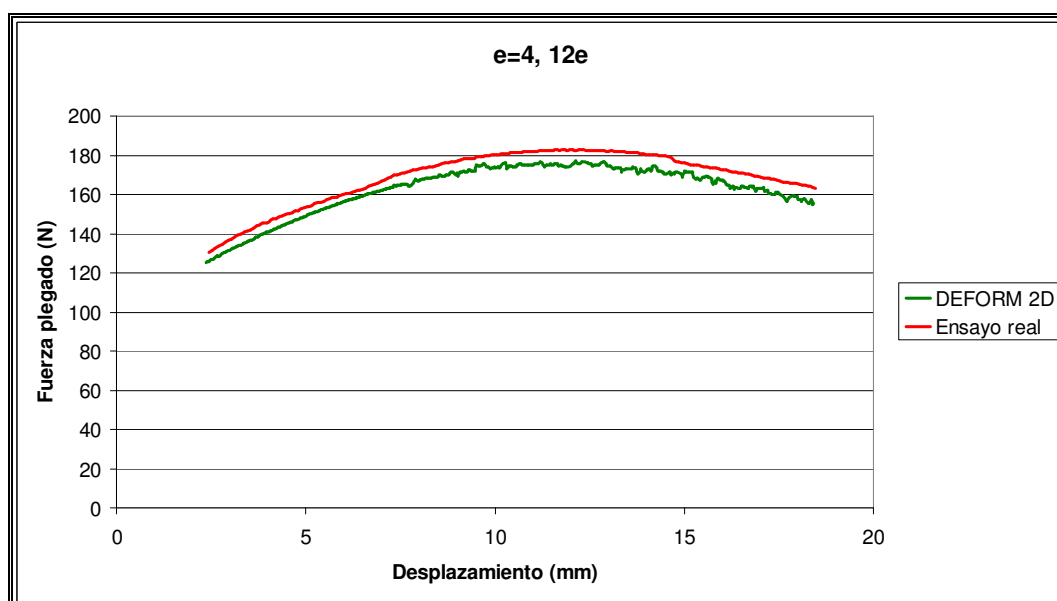


**Gráfica 58. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 10-espesor**

- Abertura  $12 \cdot e = 48 \text{ mm}$



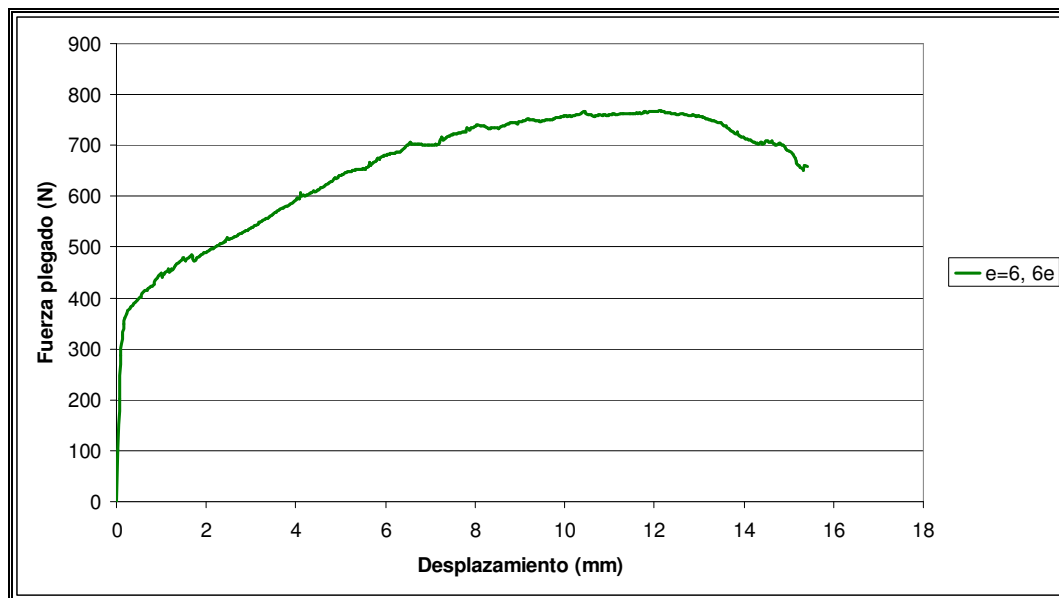
**Gráfica 59. Resultado final fuerza plegado espesor 4, abertura 12·espesor**



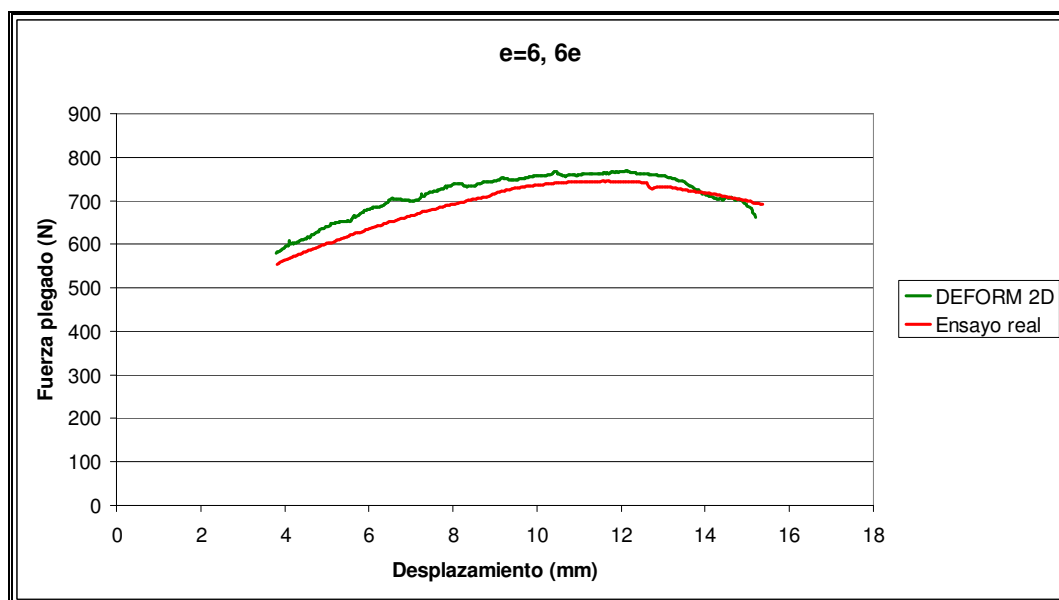
**Gráfica 60. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 4, abertura 12·espesor**

## ESPESOR 6mm

- Abertura  $6 \cdot e = 36$  mm

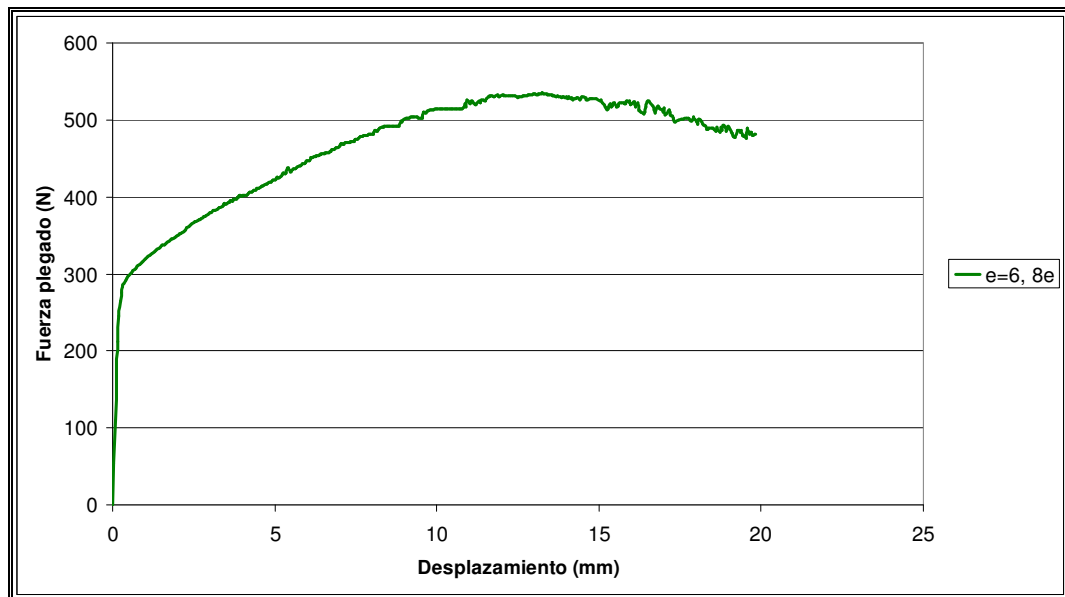


**Gráfica 61. Resultado final fuerza plegado espesor 6, abertura 6-espesor**

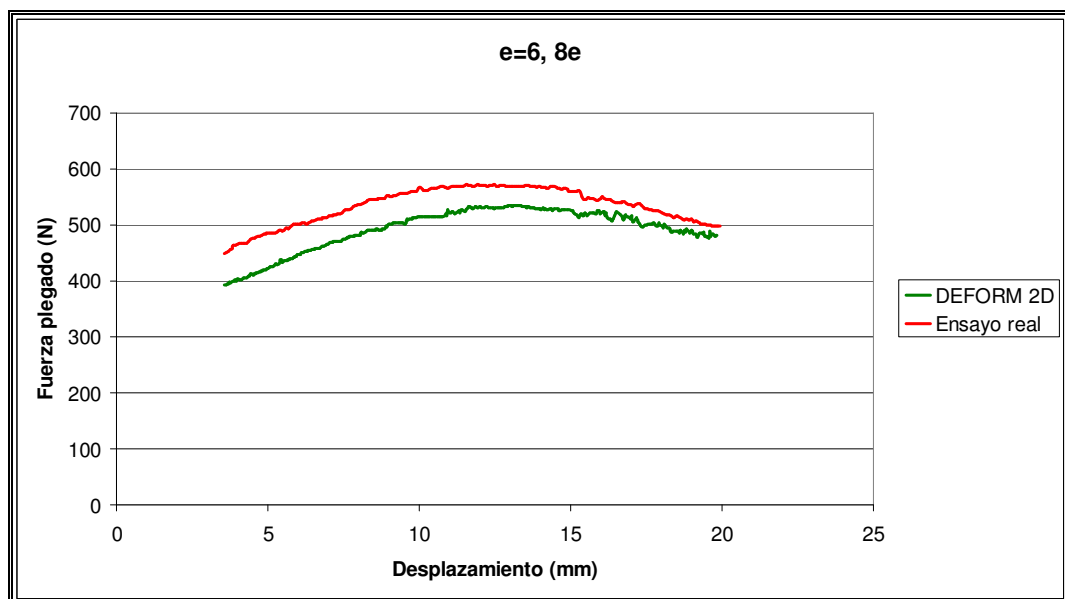


**Gráfica 62. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 6, abertura 6-espesor**

- Abertura  $8 \cdot e = 48 \text{ mm}$

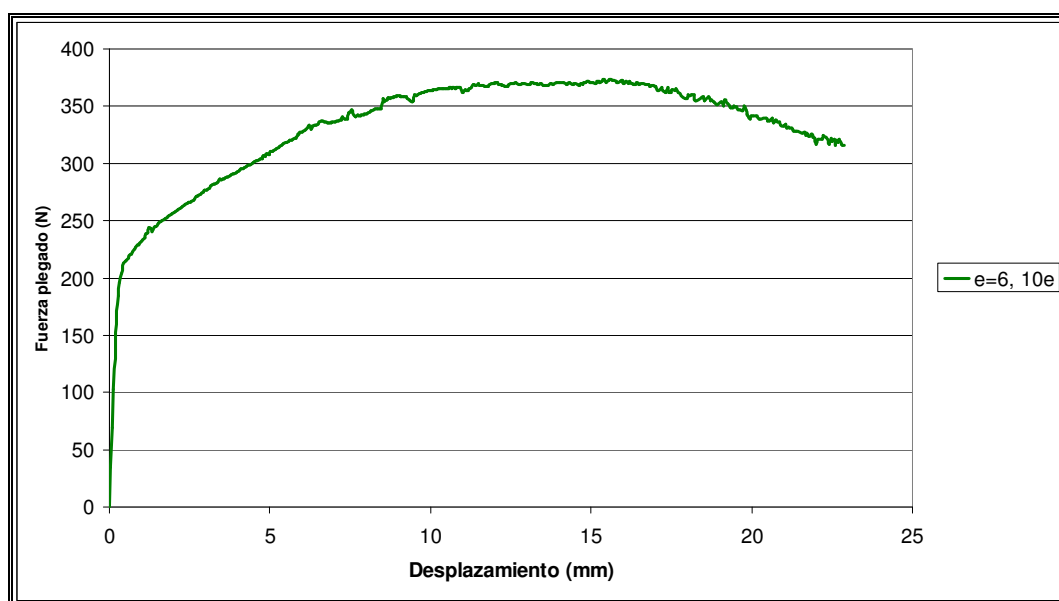


**Gráfica 63. Resultado final fuerza plegado espesor 6, abertura 8·espesor**

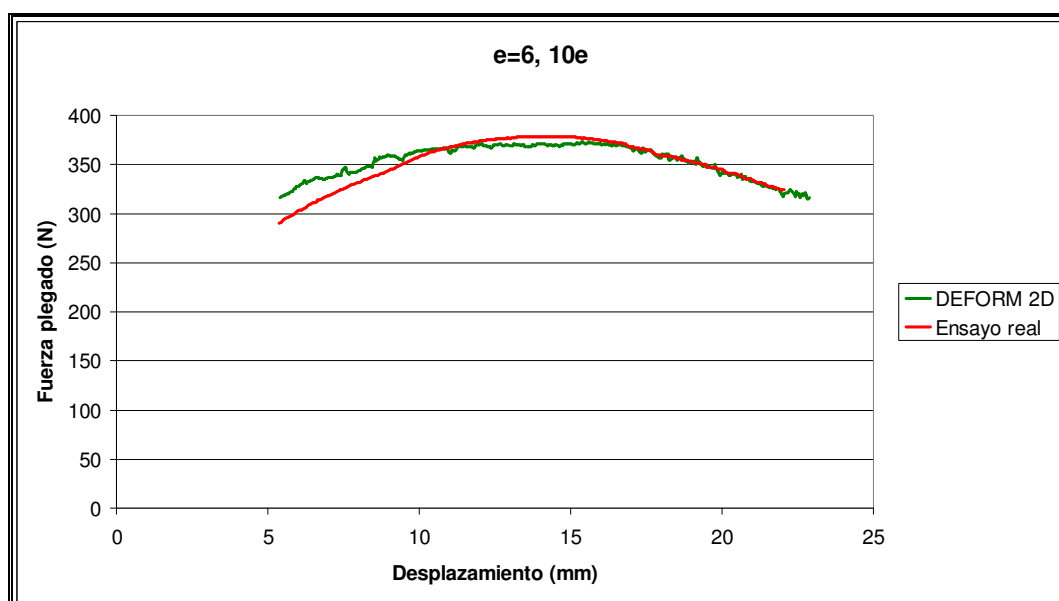


**Gráfica 64. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 6, abertura 8·espesor**

- Abertura  $10 \cdot e = 60 \text{ mm}$



**Gráfica 65. Resultado final fuerza plegado espesor 6, abertura 10·espesor**



**Gráfica 66. Zoom comparación fuerza final plegado y ensayos reales espesor 6, abertura 10·espesor**



#### 4.6.1.1. Resultados teóricos

Es también importante comparar los resultados obtenidos con los resultados teóricos que se obtendrían con las dimensiones de chapa y matriz utilizadas en el modelo.

De manera teórica, el valor máximo de la fuerza de plegado viene dado por la expresión:

$$F_{m\acute{a}x} = k \cdot \frac{\sigma_u \cdot L \cdot s^2}{v}$$

**Ecuación 4**

k = constante

$\sigma_u$  = Resistencia a la tracción

L = Longitud del pliegue

s = espesor de la chapa

v = Abertura de la matriz

Según la bibliografía consultada, el valor de la constante varía entre 0'85 y 1'35. Se toma como valor de la constante 1'27, puesto que minimiza la diferencia entre los ensayos reales y los teóricos. La resistencia a la tracción del AISI 304 es de 515 MPa.

Como longitud de pliegue se utiliza la unidad, es decir, 1 mm.

Al analizar los valores de los errores obtenidos en este apartado, se aprecia que la media de los errores relativos entre el valor teórico y el valor tomado en ensayos de plegado en el laboratorio ha sido de 9'16 %, siendo el error máximo de un 16'39 %.

#### ESPESOR 3 mm

- Abertura  $8 \cdot e = 24$  mm

$$F_{m\acute{a}x} = 1'27 \cdot \frac{515MPa \cdot 1mm \cdot 3^2 mm^2}{24mm} = 245'27N$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error  |
|-----------------------|-------------------|--------|
| 240 N                 | 245'27 N          | 2'14 % |

- Abertura  $10 \cdot e = 30 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 3^2 \text{ mm}^2}{30 \text{ mm}} = 196'21 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error   |
|-----------------------|-------------------|---------|
| 170 N                 | 196'21 N          | 13'35 % |

- Abertura  $12 \cdot e = 36 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 3^2 \text{ mm}^2}{36 \text{ mm}} = 163'51 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error   |
|-----------------------|-------------------|---------|
| 142 N                 | 163'51 N          | 13'15 % |

#### ESPESOR 4 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 24 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 4^2 \text{ mm}^2}{24 \text{ mm}} = 436'03 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error  |
|-----------------------|-------------------|--------|
| 450 N                 | 436'03 N          | 3'19 % |

- Abertura  $8 \cdot e = 32 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 4^2 \text{ mm}^2}{32 \text{ mm}} = 327'02 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error  |
|-----------------------|-------------------|--------|
| 305 N                 | 327'02 N          | 6'72 % |

- Abertura  $10 \cdot e = 40 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 4^2 \text{ mm}^2}{40 \text{ mm}} = 261'62 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error  |
|-----------------------|-------------------|--------|
| 253 N                 | 261'62 N          | 3'28 % |

- Abertura  $12 \cdot e = 48 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 4^2 \text{ mm}^2}{48 \text{ mm}} = 218'01 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error   |
|-----------------------|-------------------|---------|
| 183 N                 | 218'01 N          | 16'05 % |

#### ESPESOR 6 mm

- Abertura  $6 \cdot e = 36 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 6^2 \text{ mm}^2}{36 \text{ mm}} = 654'05 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error   |
|-----------------------|-------------------|---------|
| 744 N                 | 654'05 N          | 13'74 % |

- Abertura  $8 \cdot e = 48 \text{ mm}$

$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 6^2 \text{ mm}^2}{48 \text{ mm}} = 490'54 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error   |
|-----------------------|-------------------|---------|
| 571 N                 | 490'54 N          | 16'39 % |

- Abertura  $10 \cdot e = 60 \text{ mm}$

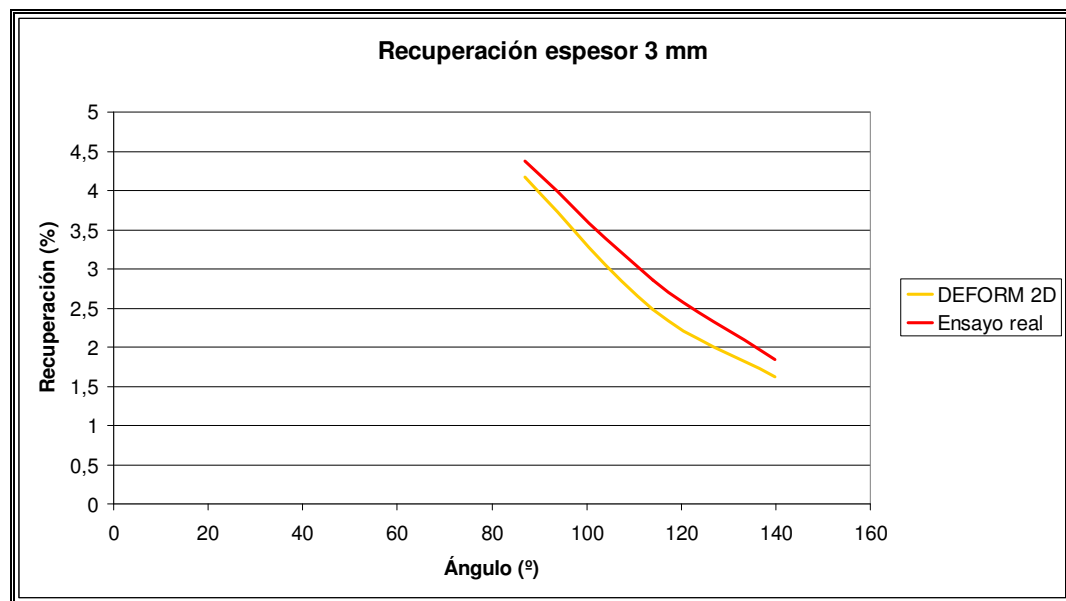
$$F_{\text{máx}} = 1'27 \cdot \frac{515 \text{ MPa} \cdot 1 \text{ mm} \cdot 6^2 \text{ mm}^2}{60 \text{ mm}} = 392'43 \text{ N}$$

| Resultado Ensayo real | Resultado teórico | Error  |
|-----------------------|-------------------|--------|
| 378 N                 | 392'43 N          | 3'66 % |

#### 4.6.2. Recuperación

Otro de los parámetros interesantes desde el punto de vista práctico, es el ángulo de recuperación del material. Se entiende por recuperación la diferencia de ángulos entre el conseguido en el punto más bajo de descenso del macho y el final obtenido cuando el macho ya se ha retirado. Esta diferencia es la debida a la recuperación elástica del material.

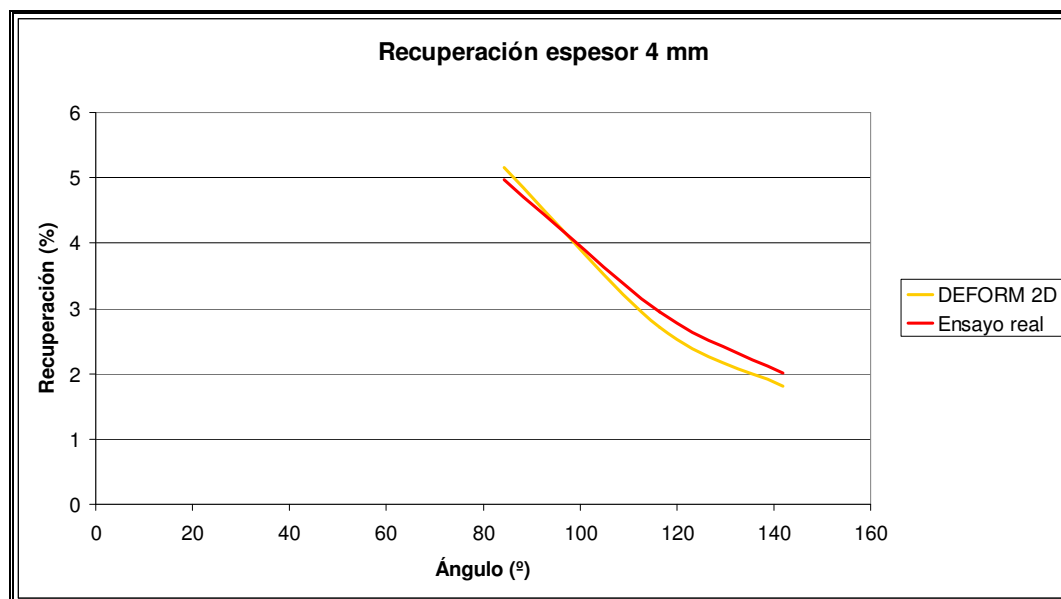
Se muestra en el gráfico y se comparan en la tabla siguiente los valores, para diferentes ángulos de plegado, de sus correspondientes valores de recuperación, tanto la obtenida a partir de ensayos como la calculada por el modelo. Todos los casos se realizan con una abertura de 8 veces el espesor.



**Gráfica 67. Comparación recuperación espesor 3, abertura 8-espesor**

| Espesor 3 mm |                          |                            |         |
|--------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| Ángulo       | Recuperación DEFORM 2D % | Recuperación Ensayo real % | Error % |
| 86'92        | 4'166                    | 4'372                      | 0'16    |
| 114          | 2'477                    | 2'851                      | 0'64    |
| 139'75       | 1'629                    | 1'839                      | 0'30    |

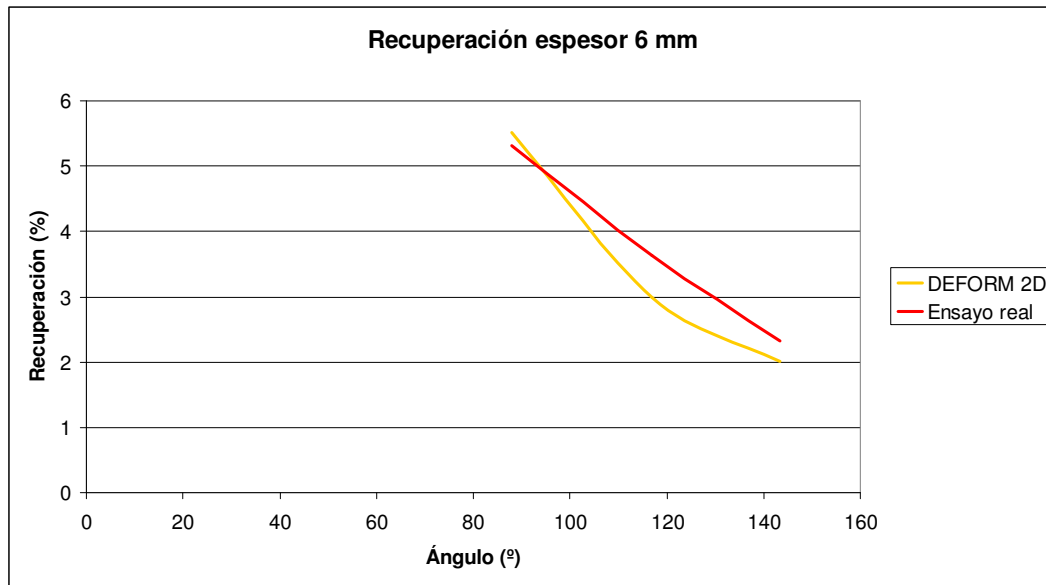
**Tabla 19. Recuperaciones para distintos ángulos, espesor 3**



**Gráfica 68. Comparación recuperación espesor 4, abertura 8-espesor**

| Espesor 4 mm |                          |                            |         |
|--------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| Ángulo       | Recuperación DEFORM 2D % | Recuperación Ensayo real % | Error % |
| 84'33        | 5'163                    | 4'97                       | 0'19    |
| 116'42       | 2'708                    | 2'95                       | 0'24    |
| 141'83       | 1'811                    | 2'01                       | 0'20    |

**Tabla 20. Recuperaciones para distintos ángulos, espesor 4**



**Gráfica 69. Comparación recuperación espesor 6, abertura 8-espesor**

| Espesor 6 mm |                          |                            |         |
|--------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| Ángulo       | Recuperación DEFORM 2D % | Recuperación Ensayo real % | Error % |
| 87'92        | 5'513                    | 5'31                       | 0'21    |
| 116'92       | 2'989                    | 3'63                       | 0'37    |
| 143'42       | 2'017                    | 2'32                       | 0'21    |

**Tabla 21. Recuperaciones para distintos ángulos, espesor 3**

#### 4.6.2.1. Resultados teóricos

Como se explicó en la introducción, en el proceso de conformación por plegado, cuando la presión de doblado se retira, la energía elástica permanece en la parte doblada haciendo que ésta recobre parcialmente su forma original. Esta recuperación elástica se define de una manera teórica como el incremento del ángulo comprendido por la parte doblada en relación con el ángulo comprendido por la herramienta formadora después de que ésta se retira. Se utiliza la ecuación 2, definida en el capítulo 1 y que se recuerda a continuación:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{R_i \cdot Y}{E \cdot T} \right) - 3 \cdot \left( \frac{R_i \cdot Y}{E \cdot T} \right) + 1$$

**Ecuación 2**

Donde  $R_i$  y  $R_f$  representan los radios de curvatura antes y después de subir el punzón,  $Y$  es el límite elástico al 0.2%,  $E$  y  $T$  son el módulo de elasticidad y el espesor respectivamente.

Se fija el radio final como el radio de curvatura de la chapa una vez separado el punzón, cuando la chapa llega al ángulo utilizado en el modelo y en los ensayos reales. A continuación se calcula el radio inicial, que sería el necesario para obtener el radio final después del plegado.

Mediante la siguiente fórmula se obtendría la recuperación:

$$SB = \frac{R_f - R_i}{R_i}$$

**Ecuación 5**

Donde:

$SB$  = springback o recuperación elástica;

$R_f$  = radio final tras la recuperación elástica;

$R_i$  = radio previo a la retirada del punzón.

En la ecuación 3, según la bibliografía especializada, el valor del límite elástico será de 195 MPa y el del módulo de elasticidad de 200 GPa.

### ESPESOR 3 mm

$$\bullet \quad \frac{7'059}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{7'059 \cdot 195}{200000 \cdot 3} \right) - 3 \cdot \left( \frac{7'059 \cdot 195}{200000 \cdot 3} \right) + 1 ; \quad R_f = 7'04$$

$$SB = \frac{7'059 - 7'04}{7'04} = 0'27\%$$

$$\bullet \quad \frac{7'64}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{7'64 \cdot 195}{200000 \cdot 3} \right) - 3 \cdot \left( \frac{7'64 \cdot 195}{200000 \cdot 3} \right) + 1 ; \quad R_f = 7'61$$

$$SB = \frac{7'64 - 7'61}{7'61} = 0'40\%$$

$$\bullet \quad \frac{9'725}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{9'725 \cdot 195}{200000 \cdot 3} \right) - 3 \cdot \left( \frac{9'725 \cdot 195}{200000 \cdot 3} \right) + 1 ; \quad R_f = 9'68$$

$$SB = \frac{9'725 - 9'68}{9'68} = 0'47\%$$

| Espesor 3 mm |                        |                            |         |
|--------------|------------------------|----------------------------|---------|
| Ángulo       | Recuperación teórica % | Recuperación Ensayo real % | Error % |
| 86'92        | 0'27                   | 4'37                       | 4'1     |
| 114          | 0'40                   | 2'85                       | 2'45    |
| 139'75       | 0'47                   | 1'84                       | 1'37    |

**Tabla 22. Error recuperación teórica espesor 3 mm**

#### ESPESOR 4 mm

$$\bullet \quad \frac{7'65}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{7'65 \cdot 195}{200000 \cdot 4} \right) - 3 \cdot \left( \frac{7'65 \cdot 195}{200000 \cdot 4} \right) + 1 ; \quad R_f = 7'61$$

$$SB = \frac{7'65 - 7'61}{7'61} = 0'53\%$$



- $$\frac{11'18}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{11'18 \cdot 195}{200000 \cdot 4} \right) - 3 \cdot \left( \frac{11'18 \cdot 195}{200000 \cdot 4} \right) + 1 ; \quad R_f = 11'11$$

$$SB = \frac{11'18 - 11'11}{11'11} = 0'64\%$$

- $$\frac{14'45}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{14'45 \cdot 195}{200000 \cdot 4} \right) - 3 \cdot \left( \frac{14'45 \cdot 195}{200000 \cdot 4} \right) + 1 ; \quad R_f = 14'37$$

$$SB = \frac{14'45 - 14'37}{14'37} = 0'56\%$$

| Espesor 4 mm |                        |                            |         |
|--------------|------------------------|----------------------------|---------|
| Ángulo       | Recuperación teórica % | Recuperación Ensayo real % | Error % |
| 84'33        | 0'53                   | 4'97                       | 4'44    |
| 116'42       | 0'64                   | 2'95                       | 2'31    |
| 141'83       | 0'56                   | 2'01                       | 1'45    |

**Tabla 23. Error recuperación teórica espesor 4 mm**

#### ESPESOR 6 mm

- $$\frac{11'12}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{11'12 \cdot 195}{200000 \cdot 6} \right) - 3 \cdot \left( \frac{11'12 \cdot 195}{200000 \cdot 6} \right) + 1 ; \quad R_f = 11'08$$

$$SB = \frac{11'12 - 11'08}{11'08} = 0'36\%$$

- $$\frac{14'32}{R_f} = 4 \left( \frac{14'32 \cdot 195}{200000 \cdot 6} \right) - 3 \left( \frac{14'32 \cdot 195}{200000 \cdot 6} \right) + 1 ; \quad R_f = 14'27$$

$$SB = \frac{14'32 - 14'27}{14'27} = 0'35\%$$

- $$\frac{22'37}{R_f} = 4 \left( \frac{22'37 \cdot 195}{200000 \cdot 6} \right) - 3 \left( \frac{22'37 \cdot 195}{200000 \cdot 6} \right) + 1 ; \quad R_f = 22'26$$

$$SB = \frac{22'37 - 22'26}{22'26} = 0'50\%$$

| Espesor 6 mm |                           |                               |         |
|--------------|---------------------------|-------------------------------|---------|
| Ángulo       | Recuperación<br>teórica % | Recuperación<br>Ensayo real % | Error % |
| 87'92        | 0'36                      | 5'31                          | 4'95    |
| 116'92       | 0'35                      | 3'63                          | 3'28    |
| 143'42       | 0'50                      | 2'32                          | 1'82    |

**Tabla 24. Error recuperación teórica espesor 6 mm**

## 5. ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS

### FUERZAS

En la Tabla siguiente se muestran los valores iniciales de fuerza máxima de plegado obtenidos mediante el modelo de elementos finitos, utilizando para todos ellos el mismo valor de la fuerza de rozamiento.

| Espesor chapa<br>[mm] | Abertura matriz<br>[mm] | Fuerza máxima de plegado<br>[N] |
|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 3                     | $8 \cdot e = 24$        | 235                             |
|                       | $10 \cdot e = 30$       | 182                             |
|                       | $12 \cdot e = 36$       | 150                             |
| 4                     | $6 \cdot e = 24$        | 460                             |
|                       | $8 \cdot e = 32$        | 290                             |
|                       | $10 \cdot e = 40$       | 240                             |
|                       | $12 \cdot e = 48$       | 176                             |
| 6                     | $6 \cdot e = 36$        | 770                             |
|                       | $8 \cdot e = 48$        | 535                             |
|                       | $10 \cdot e = 60$       | 375                             |

**Tabla 25. Valores iniciales fuerza máxima de plegado**

Los resultados obtenidos, están dentro de lo esperado. Como era previsible, la fuerza de plegado aumenta de una manera progresiva a medida que aumentamos el espesor de la chapa.

Al contrario ocurre con la abertura de la matriz. La fuerza máxima de plegado disminuye al aumentar la abertura entre los dos apoyos de la matriz.

Volviendo a la fórmula 4 del capítulo anterior, se ve que la fuerza máxima de plegado es proporcional al cuadrado del espesor de la chapa e inversamente proporcional a la abertura de la matriz.

Pese a todo esto se observa que los valores obtenidos difieren de los obtenidos en ensayos reales de plegado en el laboratorio. Por eso se buscó el valor del coeficiente de rozamiento comprendido entre el rango  $0'15 - 0'4$ , según bibliografía consultada, para obtener los resultados más similares a la realidad posibles. Estos resultados se recogen en la siguiente tabla:

| Espesor chapa [mm] | Abertura matriz [mm] | Fuerza máxima de plegado DEFORM 2D [N] | Fuerza máxima de plegado ensayo real [N] | Error % |
|--------------------|----------------------|--|--|---------|
| 3                  | 8·e = 24             | 240                                    | 240                                      | 0       |
|                    | 10·e = 30            | 174                                    | 170                                      | 2'299   |
|                    | 12·e = 36            | 144                                    | 142                                      | 1'389   |
| 4                  | 6·e = 24             | 450                                    | 450                                      | 0       |
|                    | 8·e = 32             | 300                                    | 305                                      | 1'667   |
|                    | 10·e = 40            | 247                                    | 253                                      | 2'429   |
|                    | 12·e = 48            | 181                                    | 183                                      | 1'105   |
| 6                  | 6·e = 36             | 745                                    | 744                                      | 0'134   |
|                    | 8·e = 48             | 550                                    | 571                                      | 3'818   |
|                    | 10·e = 60            | 378                                    | 378                                      | 0       |

**Tabla 26. Optimización de las fuerzas máximas de plegado**

Se aprecia que los resultados obtenidos son altamente satisfactorios, puesto que el error medio obtenido es de 1'284 %, no habiendo ningún valor que alcance el 4 % de error relativo con respecto al ensayo en probetas reales.

Para poder validar el modelo, se debe utilizar un valor del coeficiente de rozamiento único para todos los casos y que la diferencia o error con respecto a los ensayos reales sea la menor posible. Los resultados fueron los siguientes:

| Espesor chapa [mm] | Abertura matriz [mm] | Fuerza máxima de plegado DEFORM 2D [N] | Fuerza máxima de plegado ensayo real [N] | Error % |
|--------------------|----------------------|--|--|---------|
| 3                  | 8·e = 24             | 233                                    | 240                                      | 3'004   |
|                    | 10·e = 30            | 183                                    | 170                                      | 7'104   |
|                    | 12·e = 36            | 151                                    | 142                                      | 5'960   |
| 4                  | 6·e = 24             | 454                                    | 450                                      | 0'881   |
|                    | 8·e = 32             | 290                                    | 305                                      | 5'172   |
|                    | 10·e = 40            | 239                                    | 253                                      | 5'858   |
|                    | 12·e = 48            | 175                                    | 183                                      | 4'571   |
| 6                  | 6·e = 36             | 765                                    | 744                                      | 2'745   |
|                    | 8·e = 48             | 532                                    | 571                                      | 7'331   |
|                    | 10·e = 60            | 370                                    | 378                                      | 2'162   |

**Tabla 27. Validación de las fuerzas máximas de plegado**

Una vez más los resultados son próximos al valor de los ensayos reales, pese a que el error relativo medio ha sido del 4'478 % y que dos valores sobrepasan ligeramente del 7 %.

La causa de no haber conseguido resultados de mayor similitud es que en las probetas plegadas con espesor 3 mm fueron laminadas en frío y las de 4 mm y 6 mm en caliente. La laminación en frío parte de chapas ya laminadas en caliente y tiene el objeto de compactar y abrillantar la superficie, mejorando las características del material desde la perspectiva de las posteriores operaciones de acabado superficial. Por lo tanto no se debe asumir igual coeficiente de rozamiento para el espesor de 3 mm que para los de 4 mm y 6 mm. Evidentemente, será mayor para estos últimos.

En resumen, los resultados del modelo sería más preciso si se utiliza un coeficiente de rozamiento para el espesor 3 mm y otro coeficiente distinto para los plegados de espesores 4 mm y 6 mm.

## **RECUPERACIÓN**

En la siguiente Tabla se muestra el valor de la recuperación para diferentes ángulos, tanto para el modelo de elementos finitos en DEFORM 2D como para los ensayos reales en probetas.

| <b>Espesor 3 mm</b> |                             |                               |         |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------|
| Ángulo              | Recuperación<br>DEFORM 2D % | Recuperación<br>Ensayo real % | Error % |
| 86'92               | 4'166                       | 4'372                         | 0'16    |
| 114                 | 2'477                       | 2'851                         | 0'64    |
| 139'75              | 1'629                       | 1'839                         | 0'30    |
| <b>Espesor 4 mm</b> |                             |                               |         |
| Ángulo              | Recuperación<br>DEFORM 2D % | Recuperación<br>Ensayo real % | Error % |
| 84'33               | 5'163                       | 4'97                          | 0'19    |
| 116'42              | 2'708                       | 2'95                          | 0'24    |
| 141'83              | 1'811                       | 2'01                          | 0'20    |
| <b>Espesor 6 mm</b> |                             |                               |         |
| Ángulo              | Recuperación<br>DEFORM 2D % | Recuperación<br>Ensayo real % | Error % |
| 87'92               | 5'513                       | 5'31                          | 0'21    |
| 116'92              | 2'989                       | 3'63                          | 0'37    |
| 143'42              | 2'017                       | 2'32                          | 0'21    |

**Tabla 28. Recuperación de la chapa para diferentes ángulos y espesores.**

El error cometido en las recuperaciones es algo mayor de lo esperado. Estas discrepancias pueden ser debidas a:

- Variaciones en las propiedades del material (Módulo de Young y límite elástico).
- Errores de medida.
- Falta de precisión geométrica.
- Etc.

El error máximo en valor absoluto es de 0'64 % con respecto a la recuperación y la media de todos los errores asciende a 0'28 %

Conviene recordar que los parámetros que mayor importancia tienen a la hora de evaluar la recuperación elástica son el módulo de Young y el límite elástico. Ambos valores son muy difíciles de medir. Además para el modelo de elementos finitos, el valor del módulo de elasticidad se tomó igual a 195.000 MPa para todas las probetas. Ante la gran incertidumbre que existe para obtener los valores del módulo de Young y del límite elástico de las probetas, los resultados obtenidos pueden considerarse óptimos.

## 6. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto consiste en establecer y validar un modelo de elementos finitos que simule el proceso físico de plegado de chapa a temperatura ambiente.

Para ello se realizan una serie de ensayos en DEFORM 2D y se comparan con los ensayos realizados en plegados reales en el laboratorio para poder validar el modelo.

Además se ha hecho un estudio de la sensibilidad del modelo realizado por elementos finitos con el que se pretende ver cómo varía la fuerza de plegado en función de:

- Tamaño de los elementos.
- Módulo de elasticidad.
- Coeficiente de rozamiento.

Según la gráfica 5, se puede apreciar que el paso de 1000 elementos de mallado a 2000 elementos y a su vez a 3000 elementos, tiene una apreciable repercusión en el ajuste del valor final de la fuerza máxima de plegado, mientras que en el paso de 3000 elementos de mallado a 4000 elementos, prácticamente es inapreciable el cambio de la fuerza máxima de plegado. Esto justifica que se usara 3000 elementos para todos los ensayos de plegado mediante elementos finitos, puesto que como ya se explicó, un aumento en la densidad del mallado genera que el tiempo de procesado crezca en demasía, no mereciendo la pena para el escaso ajuste que se conseguía en los resultados.

De acuerdo a la gráfica 6, la fuerza de plegado varía un 4 % de la variación del módulo de elasticidad, por lo que se consideró que la repercusión del módulo de elasticidad no tendría consecuencias importantes en el modelo de elementos finitos.

El valor que se tuvo en cuenta a la hora de optimizar el modelo de elementos finitos es el coeficiente de rozamiento de la chapa, al variar la fuerza de plegado un 8'52 % de la variación del coeficiente de rozamiento.



Tras comparar los resultados en ensayos reales con los resultados del modelo de elementos finitos, se observa en ambos casos que la fuerza máxima de plegado es directamente proporcional al espesor de la chapa utilizada. La fuerza máxima de plegado es inversamente proporcional a la abertura de la matriz. La fuerza máxima de plegado no varía con el radio de punta del macho.

Pero además de estas conclusiones obtenidas después de contrastar los resultados proporcionados por el modelo de elementos finitos y los resultados de los ensayos experimentales, con el modelo de elementos finitos se ha analizado cómo influyen determinados parámetros geométricos y referentes al material en las fuerzas de plegado y recuperación elástica de la probeta, concluyendo que:

- La fuerza máxima de plegado aumenta cuando el coeficiente de rozamiento es mayor.
- Aumentar el módulo de Young no varía la fuerza máxima de plegado.
- Aumentar el límite de elasticidad no varía la fuerza máxima de plegado significativamente.
- Al aumentar el coeficiente de rozamiento la recuperación elástica no varía

Finalmente y a la vista de los resultados obtenidos se puede decir que el modelo de plegado por elementos finitos es adecuado para los casos analizados en este proyecto.

Las discrepancias existentes entre el modelo de elementos finitos y los resultados de los ensayos para obtener los valores máximos de la fuerza de plegado no fueron muy grandes ya que los resultados en ambos casos eran muy similares. De esta manera, tampoco resultaron muy diferentes a los valores obtenidos de manera teórica.

Las discrepancias existentes entre el modelo de elementos finitos y los resultados de los ensayos para medir la recuperación elástica de las probetas, aun siendo de poca magnitud, pueden ser debidas a la dificultad para obtener los valores reales del módulo de Young y del límite elástico de una probeta.

Resulta complicado modelizar todas las condiciones de ensayo, y todavía más, las reales. Por ello, es normal que aparezcan discrepancias entre los resultados del modelo de elementos finitos y los ensayos. Lo que se debe hacer es identificar qué parámetros o factores son los que la provocan para actualizar el modelo y acercarnos más a la realidad.

## 7. TRABAJOS FUTUROS

- Analizar la variación de la fuerza máxima de plegado y recuperación elástica del material para un modelo de plegado con calentamiento lineal localizado. Comparar los valores obtenidos con los proporcionados por el modelo de plegado de elementos finitos a temperatura ambiente desarrollado en este proyecto.
- Ampliar el caso anterior al análisis de la pérdida de calor en la chapa, después de su calentamiento, hasta el momento de su conformación definitiva.
- Ampliación del modelo a otros materiales tales como el latón, el aluminio o el titanio de interés en los procesos industriales de conformación por plegado.
- Análisis de los esfuerzos a los que se encuentra sometido el utillaje durante la conformación por plegado.
- Analizar la fuerza máxima de plegado y la recuperación elástica del material para plegados no simétricos.
- Ampliar el modelo a otros anchos de chapa para cada uno de los espesores utilizados.
- Ampliación del modelo a mayores espesores de chapa y/o analizar en estos casos la incidencia de un cambio en el radio de punta del macho.
- Aumentar el estudio a otros tipos de plegado, tales como plegado a fondo o plegado con golpe y compararlo con los obtenidos en el modelo desarrollado en este proyecto.

- Hacer un estudio preciso y detallado del material a emplear, identificando del modo más preciso posible, los valores del módulo de Young y del límite elástico del material. Esta información será introducida en el modelo con el fin de evitar variaciones importantes entre los datos proporcionados por los ensayos reales y los del modelo por elementos finitos.
- Analizar los resultados obtenidos en fuerza de plegado y recuperación del material y tensiones en el utillaje, al realizar los plegados con otra geometría de la matriz.
- Analizar detalladamente las tensiones y deformaciones generadas en la probeta durante el proceso de plegado de la misma.
- Analizar y estudiar el adelgazamiento de la chapa durante el proceso de plegado.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

### **“Introducción a los Procesos de Fabricación”**

*Mª del Mar Espinosa Escudero*

Cuadernos de la UNED

### **“Handbook of FABRICATION PROCESSES “**

*O.D. Lascoe*

ASM International

### **“Diseño en Ingeniería Mecánica”**

*Joseph Edeard Shigley – Charles R. Mischke*

McGraw-Hill

### **“Los aceros inoxidables”**

*Grabielle Di Caprio*

Grupinox

### **“Métodos numéricos”**

*Francis Scheid*

McGraw Hill

### **“Introducción a los métodos numéricos”**

*Aleksandr Andreevich Samarski*

Mir

### **“Problemas Resueltos de Tecnología de Fabricación”**

*M.H. Miguélez, J.L. Cantero, J.A. Canteli, J.G. Filippone*

Thomson Paraninfo

---

**“Apuntes de TECNOLOGÍA MECÁNICA”**

*M.H. Miguélez, J.L. Cantero, J.A. Canteli, J.G. Filippone*

Departamento de Tecnología Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid

**“Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies”**

*Özgür Tekaslan, Nedim Gerger, Ulvi Şeker*

Materials & Design, Volume 29, Issue 5, 2008, Pages 1043-1050